



La esencia de la vida

MARK A. BEDAU
CAROL E. CLELAND
(COMPILADORES)

*Enfoques clásicos y contemporáneos
de filosofía y ciencia*



MARK A. BEDAU

es profesor en el Reed College de Oregon, EUA.

Sus áreas de investigación abarcan la biología evolutiva, la creación de vida sintética, los procesos de optimización en inteligencia artificial y las implicaciones éticas del desarrollo de vida artificial.

CAROL E. CLELAND

es profesora de filosofía e investigadora de la Universidad de Colorado y forma

parte del Instituto de Astrobiología de la NASA.

Sus líneas de investigación transitan por la filosofía de la ciencia, la lógica y la metafísica.

SECCIÓN DE OBRAS DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

LA ESENCIA DE LA VIDA

Comité de selección de obras

Dr. Antonio Alonso
Dr. Francisco Bolívar Zapata
Dr. Javier Bracho
Dr. Juan Luis Cifuentes
Dra. Rosalinda Contreras
Dra. Julieta Fierro
Dr. Jorge Flores Valdés
Dr. Juan Ramón de la Fuente
Dr. Leopoldo García-Colín Scherer †
Dr. Adolfo Guzmán Arenas
Dr. Gonzalo Halffter
Dr. Jaime Martuscelli
Dra. Isaura Meza
Dr. José Luis Morán López
Dr. Héctor Nava Jaimes
Dr. Manuel Peimbert
Dr. José Antonio de la Peña
Dr. Ruy Pérez Tamayo
Dr. Julio Rubio Oca
Dr. José Sarukhán
Dr. Guillermo Soberón
Dr. Elías Trabulse

La esencia de la vida

ENFOQUES CLÁSICOS Y CONTEMPORÁNEOS
DE FILOSOFÍA Y CIENCIA

MARK A. BEDAU
CAROL E. CLELAND
(compiladores)

Traducción
MARIANO SÁNCHEZ-VENTURA

Revisión técnica
VLADIMIR CACHÓN
ANA BARAHONA



FONDO DE CULTURA ECONÓMICA

Primera edición en inglés, 2010
Primera edición en español, 2016
Primera edición electrónica, 2016

Bedau, Mark A., y Carol E. Cleland (comps.)

La esencia de la vida. Enfoques clásicos y contemporáneos de filosofía y ciencia / comp. de Mark A. Bedau, Carol E. Cleland; trad. de Mariano Sánchez-Ventura ; rev. técnica de Vladimir Cachón, Ana Barahona. — México : FCE, 2016

870 p. : ilus. ; 23 × 17 cm — (Sección de Obras de Ciencia y Tecnología)

Título original: *The Nature of Life: Classical and Contemporary Perspectives from Philosophy and Science*

ISBN 978-607-16-2455-0

1. Origen de la vida 2. Naturaleza de la vida 3. Ciencia — filosofía I. Cleland, Carol E., comp. II. Sánchez-Ventura, Mariano, tr. III. Cachón, Vladimir, rev. IV. Barahona, Ana, rev. V. Ser. VI. t.

LC Q175

Dewey 501 B148e

Diseño de portada: Teresa Guzmán Romero

Título original: *The Nature of Life: Classical and Contemporary Perspectives from Philosophy and Science*, Cambridge University Press

© 2010, M. A. Bedau y C. E. Cleland

D. R. © 2016, Fondo de Cultura Económica
Carretera Picacho-Ajusco, 227; 14738 México, D. F.
Empresa certificada ISO 9001:2008

Comentarios: editorial@fondodeculturaeconomica.com
www.fondodeculturaeconomica.com
Tel. (55) 5227-4672

Se prohíbe la reproducción total o parcial de esta obra, sea cual fuere el medio, sin la anuencia por escrito del titular de los derechos

ISBN 978-607-16-2455-0

ISBN 978-607-16-3581-5 (PDF)

Impreso en México • *Printed in Mexico*

SUMARIO

<i>Prefacio</i>	9
<i>Agradecimientos</i>	11
<i>Introducción</i>	13

Primera parte

ESTUDIOS CLÁSICOS SOBRE LA VIDA [21]

I. Acerca del alma (<i>fragmentos</i>), ARISTÓTELES	39
II. El tratado del hombre (<i>fragmentos</i>), RENÉ DESCARTES	53
III. Crítica del juicio (<i>fragmentos</i>), IMMANUEL KANT	64
IV. ¿Qué es la vida? (<i>fragmentos</i>), ERWIN SCHRÖDINGER	115
V. La naturaleza de la vida, ALEXANDER OPARIN	153
VI. ¿Cuál es el significado de la “vida”?, ERNST MAYR	187
VII. Los principios de la vida (<i>fragmentos</i>), TIBOR GÁNTI	214

Segunda parte

EL ORIGEN Y LA AMPLITUD DE LA VIDA NATURAL [237]

VIII. El origen de la vida: un resumen de los datos y las especulaciones, LESLIE E. ORGEL	255
IX. Las interacciones de las moléculas pequeñas fueron centrales en el origen de la vida, ROBERT SHAPIRO	271
X. ¿Son tan diferentes las distintas hipótesis sobre la emergencia de la vida?, IRIS FRY	285
XI. La naturaleza universal de la bioquímica, NORMAN R. PACE	326
XII. ¿Existe un modelo químico común de la vida en el universo?, STEVEN A. BENNER, ALONSO RICARDO y MATTHEW A. CARRIGAN	340
XIII. La búsqueda de la vida en el universo: enseñanzas de la Tierra, KENNETH H. NEALSON	385
XIV. La posibilidad de vida microbiana alternativa en la Tierra, CAROL E. CLELAND y SHELLEY D. COPLEY	406
XV. Introducción a los límites de la vida orgánica en los sistemas	

planetarios, NATIONAL RESEARCH COUNCIL OF THE NATIONAL ACADEMIES	429
--	-----

Tercera parte

LA VIDA ARTIFICIAL Y LA BIOLOGÍA SINTÉTICA [443]

XVI. Enseñanzas del funcionalismo: el porvenir de la vida artificial fuerte, ELLIOT SOBER	459
XVII. La vida, la “vida artificial” y la explicación científica, MARC LANGE	481
XVIII. La vida alienígena: ¿cómo sabríamos?, MARGARET A. BODEN	506
XIX. Diseño y manufactura automáticos de formas de vida robóticas, HOD LIPSON y JORDAN P. POLLACK	529
XX. ¿Un paso gigantesco hacia la vida artificial?, DAVID DEAMER	544
XXI. Las células mínimas semisintéticas experimentales: un resumen, PIER LUIGI LUISI, FRANCESCA FERRI y PASQUALE STANO	551
XXII. La creación de “vida auténtica”, EVELYN FOX KELLER	585

Cuarta parte

DEFINICIÓN Y EXPLICACIÓN DE LA VIDA [597]

XXIII. Definiciones de la vida, CARL SAGAN	617
XXIV. Los siete pilares de la vida, DANIEL E. KOSHLAND	624
XXV. Una definición universal de la vida: autonomía y evolución abierta, KEPA RUIZ-MIRAZO, JULI PERETÓ y ÁLVARO MORENO	630
XXVI. ¿Hay una definición de la “vida”?, CAROL E. CLELAND y CHRISTOPHER CHYBA	661
XXVII. Sinfonía de los sentidos, LYNN MARGULIS y DORION SAGAN	690
XXVIII. ¿Qué es la vida?, KIM STERELNY y PAUL GRIFFITHS	720
XXIX. El darwinismo universal, RICHARD DAWKINS	731
XXX. ¿Qué es la vida? ¿Tuvo razón Schrödinger?, STUART A. KAUFFMAN	759
XXXI. Cuatro enigmas sobre la vida, MARK A. BEDAU	795

<i>Bibliografía suplementaria sobre la vida</i>	823
<i>Acerca de los autores</i>	839
<i>Índice analítico</i>	851
<i>Índice general</i>	861

PREFACIO

Esta obra es una compilación de reflexiones sobre la naturaleza de la vida. La idea del libro nació cuando nos vimos por primera vez y descubrimos que poseíamos una mutua preocupación por la naturaleza de la vida y una formación profesional común en los campos de la filosofía de la ciencia y la filosofía de la biología, así como experiencia científica complementaria en relación con el origen de la vida y la astrobiología (Cleland), con la vida artificial y la biología sintética (Bedau). Ambos queríamos realizar un libro como el presente, de manera que decidimos compilarlo en conjunto. Los temas que nos interesaban y nuestra formación nos indujeron a distribuir los materiales en cuatro áreas generales: *i*) disertaciones filosóficas y científicas, clásicas y modernas, sobre la naturaleza de la vida; *ii*) disertaciones científicas y filosóficas contemporáneas sobre los orígenes de la vida y sobre la posible composición química de formas de vida natural no conocidas; *iii*) disertaciones sobre las creaciones contemporáneas de la ciencia de la vida artificial, incluidas no sólo las simulaciones computacionales, sino también los robots autorreproductores, las protocélulas y otras estructuras creadas en el laboratorio por la biología sintética, y *iv*) disertaciones filosóficas y científicas contemporáneas sobre la naturaleza de la vida, en su forma más general y menos centrada en la vida terráquea conocida. La realización de este trabajo nos ha confirmado el valor de combinar múltiples perspectivas sobre la vida.

Tenemos la esperanza de que este libro pueda proporcionar a los filósofos conocimientos sobre los últimos adelantos científicos y pueda introducir a los científicos al mundo de los sutiles enigmas y problemas de la filosofía, promoviendo de esta manera una nueva, bien documentada y profunda reflexión filosófica y científica en torno a la naturaleza de la vida. Creemos que el verdadero avance en la comprensión de la vida depende decisivamente de la combinación de las perspectivas filosóficas y científicas.

Este libro se dirige al público en general. Algunos de los capítulos son muy accesibles y otros bastante técnicos. Cada parte está precedida por una introducción que conecta las diversas ideas expuestas en los capítulos respectivos y que proporciona útiles conceptos básicos para su comprensión. Esperamos que los filósofos interesados en la vida (incluidos los que trabajan en los campos de la fi-

lososofía de la biología, la filosofía de la ciencia y la filosofía de la mente) lean con especial atención los capítulos científicos y que los científicos interesados en la naturaleza de la vida (incluidos los biólogos, químicos, físicos, astrónomos, geólogos y astrobiólogos) lean con especial atención los capítulos filosóficos. También los estudiantes universitarios y de posgrado en cualquiera de estas áreas podrán encontrar cierta utilidad en este libro en cuanto compendio de textos interdisciplinarios sobre la vida. Asimismo, podrá ser del agrado de toda persona que sienta curiosidad sobre las últimas perspectivas científicas y filosóficas de la vida.

MARK A. BEDAU, *Portland, Oregon*

CAROL E. CLELAND, *Boulder, Colorado*

AGRADECIMIENTOS

Los compiladores queremos expresar nuestro agradecimiento a los autores y editores que nos otorgaron el permiso de incluir sus textos en la versión en inglés de esta antología. Agradecemos especialmente a Chris Shields que nos haya permitido utilizar parte de su nueva traducción de *De anima*, que pronto será publicada por la Oxford University Press.

También queremos mostrar nuestro agradecimiento a muchos amigos y colegas que han compartido y propiciado nuestra creciente fascinación por la vida y los esfuerzos por comprenderla, y que nos han ayudado durante el desarrollo de este libro. Gracias a Bob Hanna por la ayuda en la selección de los pasajes de Kant, y a Meg Scharle por el apoyo en la selección de los pasajes de Aristóteles. Gracias a Kellyn Bardeen por obtener los permisos, corregir los manuscritos y producir el manuscrito final, y a Emily Parke por encargarse de las miles de cruciales tareas asistenciales. Gracias a Ben Pagelar y Michael Zerella de la Universidad de Colorado, campus Boulder, por su ayuda para reunir la bibliografía. Tenemos una deuda de gratitud con los filósofos y científicos en formación que participaron en el seminario sobre la vida impartido por Carol Cleland en 2006 y que, entusiasta e industriosamente, escrutaron los ensayos en la primera versión de este libro, ayudándonos a decidir cuáles deberían incluirse como capítulos en la versión final. Gracias al Instituto de Astrobiología de la NASA por proporcionarnos parte del financiamiento de este proyecto mediante un subsidio al Centro de Astrobiología de la Universidad de Colorado, y a Reed College por conferirnos la beca Stillman Drake que sustentó este proyecto. Gracias también al Centro de Computación Avanzada de Reed College por la hospitalidad que nos ofreció durante la crucial etapa final de la preparación de la obra.

INTRODUCCIÓN

Esta obra es una compilación de las concepciones clásicas y contemporáneas que en relación con la naturaleza de la vida han forjado diversos filósofos y científicos. Por lo menos desde los tiempos del filósofo griego Aristóteles, los filósofos han meditado sobre la pregunta “¿qué es la vida?”. En años recientes esta interrogante ha asumido una creciente importancia científica. Los biólogos y los bioquímicos moleculares que investigan el origen de la vida o intentan sintetizar químicamente la vida en el laboratorio a partir de elementos moleculares básicos, quieren saber en qué etapa un conjunto de moléculas sin vida se convierte en un organismo viviente primitivo. Los astrobiólogos encargados de diseñar para las naves espaciales los aparatos capaces de detectar la vida extraterrestre se enfrentan a la cuestión de qué características conocidas de la vida terrestre (¿el metabolismo, la reproducción, la evolución darwiniana?) son indicadores universales de la vida. Incluso los científicos de la computación se ven envueltos en las cuestiones sobre la naturaleza de la vida cuando se preguntan si los sistemas de vida aparentemente vivos construidos con *software* (estructuras puramente digitales o informáticas) o con *hardware* (metal, plástico y silicón) podrían llegar a ser jamás organismos literalmente vivientes. Muchas de estas preguntas cruciales se caracterizan por la ausencia de una solución científica; no es posible responder a ellas únicamente mediante la realización de más experimentos o la construcción de más sistemas de vida aparental. Aunque han surgido de la ciencia, estas cuestiones son profundamente filosóficas.

Un filósofo estadounidense del siglo xx, W. V. O. Quine,¹ planteó que la epistemología podía verse como una “actividad dentro de las ciencias naturales”. Con una idea similar, los compiladores de esta obra piensan que la colaboración entre los científicos y los filósofos puede proporcionar la esperanza de alcanzar una respuesta convincente a la cuestión de la naturaleza de la vida. La ciencia contemporánea ha acrecentado nuestra comprensión de las complejidades de la vida natural y ha proporcionado muchos fascinantes ejemplos de nuevos sistemas de vida artificial. Pero una respuesta intelectualmente satisfactoria a la pregunta

¹ W. V. O. Quine, “The Nature of Empirical Knowledge”, en S. Guttenplan (comp.), *Mind and Language*, Oxford University Press, Oxford, 1975, pp. 57-81.

“¿qué es la vida?” requiere algo más. Requiere el análisis, la evaluación y la sistematización de la heterogénea información que está surgiendo de una multiplicidad de disciplinas científicas. A la filosofía le resulta natural desempeñar un papel central en este proceso. Los filósofos han sido adiestrados en el análisis lógico y conceptual; tienen la capacidad para categorizar las cuestiones fundamentales, para poner al descubierto las inconsistencias sutiles, transformar las generalizaciones vagas en principios lógicos precisos, identificar las relaciones lógicas entre los conceptos, los principios, las hipótesis y las evidencias empíricas, y evaluar la firmeza de los argumentos y las teorías. La filosofía aporta claridad conceptual y rigor lógico a la teorización científica. Al mismo tiempo, la ciencia arraiga la reflexión filosófica en la evidencia empírica obtenida mediante la cuidadosa observación y experimentación. Conjuntamente, la filosofía y la ciencia contemporáneas sustentan la promesa de encontrar una respuesta satisfactoria a la cuestión intemporal de la naturaleza de la vida.

El contenido de esta antología es el resultado de muchas discusiones estimulantes entre los compiladores y sus colegas científicos y filósofos relacionadas con la indagación de cuáles son las cuestiones más relevantes de la vida. Los ensayos seleccionados representan tan sólo una pequeña porción de la extensa bibliografía filosófica y científica que hay sobre la naturaleza de la vida; a los lectores se les aconseja consultar al final de esta obra la amplia bibliografía suplementaria, donde encontrarán muchos excelentes e importantes trabajos en torno a la vida. Pretendimos ser representativos, es decir, quisimos incluir tanto los escritos clásicos que abarcan las ideas científicas y filosóficas históricamente más influyentes, como las posturas de avanzada en la ciencia y la filosofía contemporáneas. Los ensayos también fueron seleccionados con base en su propósito de arrojar luz sobre temas y controversias acerca de la vida que son centrales en la actualidad, como son los recientes descubrimientos microbiológicos que han puesto en entredicho las concepciones tradicionales sobre la naturaleza de la vida. Además, quisimos incluir diferentes planteamientos respecto a la metodología; por ejemplo, si la mejor respuesta a la pregunta “¿qué es la vida?” es una definición o una teoría, u otra cosa totalmente diferente.

Hemos dividido esta antología en cuatro partes, que corresponden a las cuatro áreas centrales de la investigación científica y filosófica contemporánea: estudios clásicos de la vida (primera parte), el origen y la extensión de la vida natural (segunda parte), la vida artificial y la biología sintética (tercera parte) y la definición y explicación de la vida (cuarta parte). Todas estas secciones están precedidas por una introducción que expone el debate científico y filosófico actual en

torno a la naturaleza de la vida, señalando los puntos de acuerdo y de discrepancia y planteando preguntas que, a nuestro parecer, merecen mayor atención. Es nuestra esperanza que las lecturas de este libro, en su conjunto, ayudarán a documentar y guiar sucesivas investigaciones científicas y filosóficas sobre la naturaleza de la vida.

En una famosa carta a su colega inglés Robert Hooke, el padre de la física clásica, Isaac Newton, observa: “si he alcanzado a ver más lejos es porque estoy parado en los hombros de gigantes”. Esta afirmación de Newton refleja la verdad de que la mayor parte del trabajo intelectual de avanzada se erige sobre realizaciones anteriores. Por ende, no resulta sorprendente que muchos de los debates contemporáneos en torno a la vida tengan hondas raíces históricas. Los capítulos de la primera parte proporcionan el contexto histórico de las discusiones que aparecen en el resto del libro. Iniciamos con el nacimiento de la filosofía en la antigua Grecia y el auge de la filosofía y la ciencia modernas en los siglos xvi y xvii, y continuamos con los subsecuentes desarrollos revolucionarios en la ciencia y la filosofía hasta principios del siglo xx. Estas lecturas ubican en un contexto histórico la actual reflexión en torno a la vida y nos recuerdan algunas de las grandes lecciones de esta historia. Revelan también el grado en que las perspectivas y los problemas contemporáneos reflejan sus orígenes históricos. Veamos un ejemplo: un tema central que aparece desde los escritos del filósofo griego de la Antigüedad, Aristóteles, hasta nuestros días, es la idea de que los organismos vivos poseen características funcionales, como el metabolismo y el desarrollo, que los distinguen de las sustancias inorgánicas. Como señalan los capítulos de la primera parte, una de las grandes controversias que nos legó Aristóteles, relacionada con la naturaleza de la vida, es si estas características *prima facie* “teleológicas” (intencionales, orientadas a un objetivo o autogeneradas) son primitivas o de algún modo “reducibles a” características no teleológicas (estructurales o composicionales). En los estudios clásicos incluidos en la primera parte se exploran muchos acercamientos (esencialistas, mecanicistas, vitalistas, organicistas, darwinianos, teórico-informativos, termodinámicos y químicos) a la comprensión de las características *prima facie* teleológicas de la vida. Este debate, aunque a veces disimulado por la terminología aparentemente inocua de la ciencia contemporánea, reaparece a lo largo de toda esta antología.

La segunda parte proporciona una idea general de nuestra actual comprensión del origen y la extensión de las formas naturales de la vida. La mayoría de los autores son científicos que comparten la idea de que una comprensión de la vida yace en el nivel de las moléculas y los procesos bioquímicos, en oposición a las

propiedades organizativas y funcionales de nivel superior. Esto se ve reflejado en la forma en que ellos interpretan y articulan las cuestiones tradicionales sobre la naturaleza de la vida. Por ejemplo, lo que la “nutrición” era para Aristóteles, y el “metabolismo” para los primeros biólogos modernos, se ha convertido en la “autoorganización química”, y lo que era la “reproducción” para Aristóteles, y la “evolución darwiniana mediante la selección natural” para los biólogos decimonónicos, se ha convertido en la “replicación” mediante las “estructuras genéticas [informacionales]”. Animamos al lector a considerar si es éste un nivel adecuado de análisis en la teorización sobre la vida en general.

Los autores de la segunda parte examinan diversas cuestiones importantes sobre la vida, en el contexto de los recientes desarrollos científicos en la biología molecular, la bioquímica, la microbiología y la astrobiología: ¿es gradual o abrupta la transición desde un conjunto inorgánico de moléculas hasta un primitivo organismo viviente? ¿Se puede explicar la naturaleza de la vida independientemente de una explicación del origen de la vida? ¿Qué apareció antes, la autoorganización química o las estructuras genéticas? ¿Fue el ARN [ácido ribonucleico] la molécula genética original, o fue otra sustancia el origen; por ejemplo, una superficie mineral? ¿Cuáles son las alternativas moleculares y bioquímicas de la vida? ¿Cómo podemos diseñar métodos e instrumentos para detectar formas de vida verdaderamente “extrañas” en otros lugares del Sistema Solar, dado que todas las formas de vida conocidas en la Tierra son tan similares en el nivel molecular y bioquímico? ¿Podría contener la Tierra actual formas alternativas de vida microscópica que aún no se detectan y que descienden de un origen distinto? Un par de capítulos en esta parte han sido escritos por filósofos que ponen al descubierto las suposiciones filosóficas que subyacen tras algunas investigaciones científicas sobre el origen y la extensión de la vida. También evalúan la influencia de los resultados de estas investigaciones científicas en algunas consideraciones filosóficas tradicionales y contemporáneas sobre la vida. Más de un filósofo debería conocer el material de esta sección, a fin de que sus observaciones sobre la vida se apoyen en datos científicos.

Cualquier intento contemporáneo por comprender la naturaleza de la vida debe apoyarse en los últimos desarrollos científicos importantes. La biología sintética y la vida artificial están motivando una significativa reflexión filosófica y científica sobre la naturaleza de la vida. La tercera parte se ocupa de las implicaciones de los intentos en la biología sintética y en la vida artificial por crear la vida en el laboratorio y por construir sistemas aparentemente vivientes, partiendo del *software* o del *hardware*. En algunos de los capítulos se presentan los avan-

ces de alta tecnología en la biología sintética y en la vida artificial. En otros apartados, filósofos y científicos reflexionan sobre las implicaciones más trascendentes de esos desarrollos científicos. La tesis fuerte de la vida artificial y de la biología sintética es que podemos construir nuevos tipos de sistemas (utilizando *software*, *hardware* o *wetware*) que estén literalmente vivos —tan vivos como cualquier otra forma de vida que conozcamos—. Esta tesis contrasta con la tesis menos fuerte que ve en los sistemas aparentemente vivientes contruidos por los investigadores de la vida artificial herramientas teóricas útiles para explorar las propiedades distintivas de los sistemas vivientes, pero no ve en tales herramientas organismos literalmente vivientes. Ya que la investigación en la vida artificial pretende crear nuevas formas de sistemas aparentemente vivientes, los científicos deben preguntarse qué hace que un ente esté realmente vivo. ¿Es la materia que lo compone (el citoplasma, la carne y los huesos, etc.)? ¿O son los tipos de procesos metabólicos en que participan esos materiales, de manera transitoria y pasajera? Los intentos por crear sistemas aparentemente vivientes, o aun por crear la vida misma a partir de materiales no vivientes, también enfocan la atención en diversos problemas fundamentales, como si hay una clara distinción entre la vida y la no vida, o si hay una serie ilimitada de tipos alternativos de sistemas más o menos vivientes. La biología sintética y la vida artificial también plantean una cuestión epistemológica fundamental: ¿qué clase de evidencia debemos utilizar al explicar por qué un tipo dado de sistema químico está literalmente vivo? Por ejemplo, ¿qué credibilidad debemos otorgarle a las generalizaciones derivadas únicamente de las formas conocidas de la vida en la Tierra?

La cuarta parte muestra los principales planteamientos filosóficos y científicos que se dan como respuesta a la pregunta generalizada “¿qué es la vida?”. Alcanzar una comprensión satisfactoria sobre la naturaleza de la vida involucra la explicación de una gama de fenómenos conocidos y sorprendentes. Como se revela en estos capítulos, no existe un consenso en relación con cuáles características de la vida conocida se corresponden con los “signos”, las “propiedades distintivas” o los “enigmas” que más se necesita explicar. Tenemos que discernir qué grado de credibilidad, en cuanto evidencias, se les puede otorgar a nuestras actuales preconcepciones acerca de la vida. No resulta obvia la autoridad epistemológica que deberían tener. Parte del problema es que nuestra experiencia de la vida natural se limita a la vida terrestre conocida. Tal como lo revelan los estudios de la segunda parte, hay razones científicas convincentes para pensar que toda la vida conocida en la Tierra descende de un antepasado común. También existen razones para pensar que la vida hubiera podido ser por lo menos ligeramente

diferente, pero sólo tenemos una idea mínima de cuán diferente hubiera podido ser. Esto hace difícil identificar qué características de la vida conocida en la Tierra se encuentran universalmente en todos los ejemplos actuales de vida. Hasta donde podemos saber, la vida conocida en la Tierra acaso constituye un ejemplo no representativo de todas las formas posibles de vida. Sin embargo, no todos ven este problema como algo insuperable. El desarrollo de sistemas (“duros” y “blandos”) en la vida artificial y la creación de nuevos microorganismos en el laboratorio por los biólogos sintéticos nos dan nuevas y potentes herramientas para explorar y extender nuestro concepto de la vida, y acaso incluso para aumentar la cantidad de los tipos de vida de los que disponemos para la investigación empírica. Los estudios de la cuarta parte también se enfocan en problemas teóricos fundamentales en torno a la vida, la función de la reducción y de la emergencia en las explicaciones de la vida y como la cuestión de si la vida es una especie composicional, estructural o funcional, o cierta combinación de estas tres propiedades. Los ensayos de esta sección exploran diferentes perspectivas de estas cuestiones, así como otras que se relacionan con éstas, en el contexto de los recientes avances científicos y filosóficos.

La cuestión de la metodología adecuada para la construcción y evaluación de los planteamientos sobre la naturaleza de la vida es una preocupación central en muchos de los capítulos de la cuarta parte escritos por filósofos. Uno de los problemas es el grado de evidencia en los signos, propiedades distintivas y enigmas de la vida. ¿Cuál es su función en la investigación de la naturaleza de la vida? ¿Constituyen casos probatorios en la evaluación de las explicaciones de la vida? Un aspecto notable de las investigaciones en torno a la naturaleza de la vida es la aplicación ambigua e incierta de diversas metodologías. Otra cuestión importante concierne a la amplia utilización de las definiciones en la explicación de la vida. Las definiciones pueden diferenciarse de los criterios de la vida y de los signos y las propiedades distintivas de la vida. Pueden asumir diversas formas, incluidas las pragmáticas y operativas, aunque muchos científicos y filósofos prefieren las definiciones lógicamente completas que proporcionan las condiciones necesarias y suficientes para la vida. Algunos autores de la cuarta parte rechazan el proyecto de definir la vida. Alegan que las definiciones no pueden proporcionar respuestas satisfactorias a las preguntas de “qué es”, respecto a los tipos naturales, como el agua y la vida. Según ellos, se necesitaba una teoría de la vida bien arraigada y científica. Pero ¿en qué difiere una teoría de la vida de una definición de la vida extremadamente compleja? También está la cuestión del estatus de las simulaciones computarizadas de los sistemas de vida complejos. Algunos autores arguyen que las

simulaciones pueden considerarse de manera fructífera definiciones o teorías de la vida singularmente *constructivas*. Muchos de los capítulos de la cuarta parte plantean los mismos temas. Para los hombres de ciencia que han emprendido la teorización sobre la vida, el material de esta sección podría ser especialmente útil.

Las cuatro secciones de esta antología se enlazan mutuamente mediante tres preguntas abiertas y centrales, filosóficas y científicas, sobre la naturaleza de la vida:

1. ¿Cuáles son los fenómenos característicos esenciales que exhiben todas las formas de la vida?
2. ¿Cuáles son las mejores descripciones y explicaciones de la naturaleza de la vida?
3. ¿Cuál es la forma adecuada de construir y evaluar los puntos de vista acerca de la naturaleza de la vida?

Desde nuestro punto de vista, intentar responder a cualquiera de estas preguntas aisladamente genera una maraña de espinosos problemas filosóficos y científicos que únicamente pueden resolverse mediante el planteamiento de las otras dos cuestiones. De hecho, consideramos que es difícil demarcar claramente los planteamientos filosóficos y científicos sobre la vida. El progreso fundamental en cualquiera de las dos disciplinas requiere el conocimiento y la apreciación de la otra. Este libro se propone promover la comprensión y apreciación mutuas entre las perspectivas filosófica y científica de la vida. A la larga, una buena medida de su éxito se encontrará en los avances en la comprensión de la naturaleza de la vida que con el tiempo puedan realizar sus lectores.

BIBLIOGRAFÍA

W. V. O. Quine, "The Nature of Empirical Knowledge", en S. Guttenplan (comp.), *Mind and Language*, Oxford University Press, Oxford, 1975, pp. 57-81.

PRIMERA PARTE

ESTUDIOS CLÁSICOS SOBRE LA VIDA

Para los seres humanos, la naturaleza de la vida ha sido un enigma durante mucho tiempo. ¿Son los organismos vivientes similares a, y diferentes de, los cuerpos no vivientes, tanto los naturales como los artificiales? ¿Son genuinamente esenciales para todas las posibles formas de la vida las características universales de los entes vivientes de la Tierra conocidos? Los capítulos de esta sección proporcionan perspectivas históricas clásicas respecto a los actuales debates científicos y filosóficos sobre la vida. Estas perspectivas han tenido una influencia a menudo menospreciada y a veces incluso desestimada en el pensamiento filosófico y científico de la actualidad. ¡Las ideas contemporáneas más innovadoras a veces no son tan originales, al fin y al cabo! Lo que es más importante, sin embargo, es que a veces los debates del pasado, que usualmente enfocaban temas conceptuales más generalizados y por ende más fundamentales, de manera imprevista nos ayudan a penetrar en las controversias del presente.

Esta sección se inicia con los escritos de tres gigantes intelectuales: Aristóteles, René Descartes e Immanuel Kant. Más conocidos hoy por su trabajo filosófico, todos ellos también hicieron importantes contribuciones al desarrollo de la ciencia moderna. Los tres tienen una idea diferente de la naturaleza de la vida. Como se muestra en el resto de los capítulos de esta obra, las discrepancias en sus respectivas visiones siguen siendo significativas hoy en día.

Un tema central que, habiendo surgido en los escritos del filósofo griego de la Antigüedad, Aristóteles, sigue hoy vigente, es la idea de que los entes vivientes poseen características *funcionales* distintivas. Aristóteles también pensaba que los entes vivientes se distinguen de los objetos inanimados por su capacidad para autoorganizarse (desarrollarse a partir de huevos fertilizados) y mantener esta autoorganización ante las perturbaciones, tanto las internas como las externas. A diferencia de los científicos y los filósofos de la ciencia contemporáneos, Aristóteles distinguía cuatro tipos diferentes de “causas”: la material, la eficiente, la formal y la final (comentada más adelante). Aristóteles pensaba que las formas de vida se relacionaban con causas materiales (composición material) y causas formales (organización o estructura), pero además pensaba que todas las formas de vida se relacionaban con causas finales (explicaciones teleológicas y

funcionales). El concepto que Aristóteles tenía de la vida es fundamentalmente diferente del concepto que la ciencia actual tiene de las sustancias químicas, tales como el agua, ya que el agua se distingue de otras sustancias químicas, por ejemplo, el ácido nítrico, por su exclusiva composición molecular y estructura (H_2O); la ciencia no considera que el agua pueda tener una explicación teleológica o funcional.

Los capítulos de esta sección hacen hincapié en que una de las grandes controversias sobre la naturaleza de la vida consiste en determinar si sus características *prima facie* teleológicas son primitivas o analizables con base en (es decir, “son reducibles a”) características no teleológicas (es decir, composicionales o estructurales). Aristóteles pensaba que no. Hoy, algunas personas piensan, como Aristóteles, que las extraordinarias características intencionales de la vida (la nutrición, el desarrollo, el crecimiento, el mantenimiento, la reparación, la sensación y la reproducción) no se pueden explicar sin apelar al concepto de la finalidad natural o la intencionalidad intrínseca. La cuestión de cómo proporcionar una explicación naturalista de las características *prima facie* teleológicas de los organismos vivientes ha sido esencial en los debates filosóficos y científicos sobre la vida desde los tiempos de Aristóteles.

En el alba de la física moderna, justo antes del nacimiento de Isaac Newton, Descartes (1596-1650) impugnó la antigua idea aristotélica de que la vida es intrínsecamente teleológica. Comparando los organismos vivientes con intrincados mecanismos artificiales (los relojes, los órganos de las iglesias y las fuentes mecánicas) que en su época eran tan populares, Descartes argüía que los seres sólo son máquinas extremadamente complejas. Él pensaba que los aspectos teleológicos de la vida podían analizarse enteramente utilizando los principios y los conceptos de la nueva física que por entonces veía la luz. El concepto que Descartes tenía de los sistemas vivientes se refleja hoy en ciertas tendencias de la ciencia de la vida artificial “dura” que se toman muy en serio la posibilidad de formas de vida robóticas compuestas con partes mecánicas y electrónicas (véase, por ejemplo, el capítulo XIX de esta obra). Al mismo tiempo, vale la pena señalar que algunos han argüido que la vida artificial “dura” proporciona un fuerte argumento *contra* la predominante orientación cartesiana de la ciencia cognitiva clásica y conexionista. Por ejemplo, Michael Wheeler “interpreta de manera heideggeriana el énfasis que la actual vida artificial dura/fuerte pone en la materialización [*embodiment*] y en los sistemas dinámicos”.¹

¹ M. Wheeler, *Reconstructing the Cognitive World: The Next Step*, MIT Press, Cambridge, 2007.

Menos de 200 años después Kant (1724-1804) llegó a la conclusión de que Descartes se había equivocado respecto a la capacidad de la física clásica para explicar las características teleológicas de la vida. Según Kant, la intencionalidad que muestran los seres es fundamentalmente diferente de la que muestran los más intrincados mecanismos artificiales. A diferencia de un aparato mecánico, un ser orgánico es a la par “la causa y el efecto de sí mismo”. Cuando Kant hizo su famosa declaración de que jamás habría un Newton de la biología, en realidad subrayaba su idea de que las características teleológicas de la vida jamás podrían explicarse mecánicamente. Afirmarlo en ese momento, en el apogeo de la física clásica, equivalía a decir que para estas características jamás habría una explicación física.

Kant pensaba que la teleología es la característica central de las formas de vida, aquella que las distingue de los cuerpos sin vida. Incluso los que no están de acuerdo con la explicación kantiana de la teleología estarían dispuestos a aceptar que la teleología es una de las propiedades distintivas más profundas de la vida. El pensamiento kantiano sobre la vida puso en evidencia la dificultad, previamente menospreciada, de reconciliar los aspectos *prima facie* teleológicos de la vida (la aparición de un diseño) con los conceptos no teleológicos de la física clásica. En los años sucesivos se exploraron muchos argumentos diferentes que fueron propuestos para resolver este conflicto. Algunos pensadores intentaron salirse por la tangente desarrollando conceptos o principios específicamente biológicos, mientras que otros recurrieron a la física o química no clásica (del siglo xx).

Como dice Ernst Mayr en esta primera parte (capítulo vi), el vitalismo es una idea de gran importancia histórica que propuso un concepto claramente biológico, o, según la versión que de este concepto se adopte, un principio de la vida. El vitalismo plantea que la vida se confiere a la materia no viviente mediante un tipo especial de sustancia animada (el “protoplasma”) o de fuerza o energía organizativa (“chispa vital” o “élan vital”). Los vitalistas por lo tanto están de acuerdo con Aristóteles y Kant en que las propiedades teleológicas de la vida no se pueden explicar con base en la física clásica. Se apartan de Kant, sin embargo, al afirmar que es posible explicarlas científicamente con base en conceptos o principios específicamente biológicos (sobre todo, vitalistas). Con el surgimiento de la bioquímica y la biología molecular en el siglo xx, el vitalismo dejó de atraer a los biólogos (Oparin, capítulo v de esta obra), y hoy en día se le tilda de no científico. Pero como arguye el filósofo Marc Lange en la tercera parte, un concepto aún no analizado de vitalidad todavía podría llegar a desempeñar un papel teórico fundamental (análogo al de la masa en la física newtoniana o al del protón en la física

contemporánea) en la explicación de las propiedades distintivas de la vida. (Lange, sin embargo, no apoya esta idea.)

Con el auge de la teoría de la evolución propuesta por Charles Darwin a mediados del siglo XIX, algunos filósofos y científicos concluyeron que los aspectos teleológicos de la vida se podían explicar cabalmente, al fin y al cabo, dentro del marco de la física clásica, sin la necesidad de importar conceptos dudosos como el de la vitalidad. Como lo demuestra la moderna defensa del darwinismo universal que realiza Richard Dawkins en la cuarta parte, sigue siendo popular la idea darwiniana de que la evolución mediante la selección natural esencialmente explica la vida. También se han desarrollado ideas evolucionistas más generalizadas que se inspiran en Darwin pero no se limitan a la selección natural; véase, por ejemplo, K. Ruiz-Mirazo y sus colegas y M. A. Bedau, en la cuarta parte. No todos, sin embargo, encuentran convincentes los planteamientos evolucionistas sobre la naturaleza de la vida. La biología darwiniana contemporánea establece como unidad básica de análisis las poblaciones de organismos, clasificadas según su ascendencia común (las especies, los géneros, las familias, etc., o, en los últimos años, los linajes). Por ende, algunas definiciones darwinianas de la “vida” no clasifican a los híbridos estériles, por ejemplo, las mulas, como casos de seres vivos, y algunas incluso rechazan la idea de que un organismo fértil individual cuente como un ente viviente. Lo mismo dicen algunas de las explicaciones evolucionistas más generales. Por ejemplo, Mark Bedau (véase el capítulo xxxi) afirma que los organismos individuales, incluidos tanto los caballos como las mulas, son todas formas de vida “secundarias”, y que la forma “primaria” de la vida es la biosfera en su totalidad que experimenta una “evolución ilimitada”, porque la idea de una biosfera evolutiva puede explicar lo que para él son las propiedades conocidas y los enigmas de la vida. Así, en casi todas las explicaciones evolucionistas de la vida existe una tendencia a enfocar las historias evolucionistas de las poblaciones evolutivas de organismos bien adaptados, considerando que es secundaria la importancia de los organismos individuales y de sus propiedades teleológicas individuales (la autoorganización, el automantenimiento, la autorreparación, etcétera).

Los artículos de Erwin Schrödinger, Alexander Oparin, Ernst Mayr y Tibor Gánti representan un planteamiento diferente respecto a las características teleológicas de la vida, puesto que a éstas les otorgan un adecuado sentido científico. Ninguno de estos autores piensa que las propiedades intencionales de los organismos individuales puedan entenderse totalmente a partir de los conceptos de la física clásica y la teoría darwiniana de la evolución mediante la selección natural. Aunque aceptan que la teoría de Darwin es crucial para la comprensión de aspectos

importantes de la vida en la Tierra, difieren respecto a su centralidad en la explicación de la *naturaleza* de la vida. Gánti asume la posición más extrema, alegando que la evolución darwiniana no es esencial para la vida, si ésta se considera en su generalidad, aunque sea importante para comprender la historia de la vida en la Tierra. Schrödinger, Mayr y Oparin, en cambio, creen que la evolución darwiniana es necesaria, pero no suficiente, para la vida. Piensan que se requiere algo más.

En el capítulo iv Schrödinger, un físico teórico, invoca los conceptos y principios de la “nueva” física de su época (específicamente la termodinámica estadística y la mecánica cuántica) que habían sido desarrollados en la primera parte del siglo xx. Él atribuye las propiedades teleológicas de la vida a su habilidad para mantenerse en un estado de desequilibrio mediante la extracción de la energía de su medio ambiente. De hecho, para él este metabolismo químico ilimitado es la propiedad distintiva, acaso la más esencial, de las formas de vida individuales. Este aspecto del trabajo de Schrödinger se anticipa a las actuales explicaciones de la vida, basadas en los conceptos de las estructuras disipativas y los sistemas lejos del equilibrio; por ejemplo, véase el ensayo de Stuart Kauffman en la cuarta parte.

Oparin, Mayr y Gánti, por su parte, invocan la química del siglo xx. Distanciándose aún más de la metáfora de la máquina, Oparin (capítulo v) alega que la vida es un producto de la gradual evolución química desde una “sopa primordial” hasta un sistema químico altamente complejo e integrado que es capaz de ejercer cierto grado de control en sus componentes y que no se encuentra en ningún dispositivo mecánico o eléctrico. Gánti (capítulo vii) también analiza la vida como un sistema químico, pero, a diferencia de Oparin y Mayr, lo representa con bastante originalidad como algo que se parece a una máquina. Gánti describe las formas de la vida como autómatas químicos “fluidos”; según él, los sistemas vivos son autómatas químicos (*chemotons*). El modelo gantiano del chemoton es un precursor del más abstracto modelo autopoietico de la vida propuesto por Maturana y Varela (1980), el cual no se limita a los compuestos químicos. Ambos modelos de la vida describen la vida cromosómica como una red autocatalítica separada de su entorno por una demarcación, y ambos admiten la posibilidad de que existan formas de vida incapaces de evolucionar. La autopoiesis es examinada por Luisi y sus colegas (capítulo xxi) en la tercera parte y por K. Ruiz-Mirazo y sus colegas (capítulo xxv) en la cuarta parte.

Oparin, Mayr y Gánti difieren sobre las posibilidades químicas de la vida. Mayr y Gánti aceptan la posibilidad de formas inorgánicas (por ejemplo, las basadas en el silicón) de vida química, mientras que Oparin específicamente limita la vida a los compuestos orgánicos (con un contenido de carbono). Además,

Oparin y Gánti vinculan la naturaleza de la vida con el origen de la vida, alegando que aquélla no se puede entender con exclusión de éste. Tal planteamiento no es poco común hoy en día. Se refleja en los estudios de la naturaleza de la vida que recurren a las teorías del origen de la vida, tales como el mundo del ARN; véase, por ejemplo, Pace (capítulo XI) y el informe del National Research Council (NRC), en el capítulo XV de la segunda parte. Con todo, no es obvio que una teoría de la naturaleza de la vida presuponga el entendimiento del origen de la vida (véase la introducción a la segunda parte). El origen y el alcance de la vida se tratan en detalle en la segunda parte del libro.

Todos los estudios clásicos de la vida en esta parte intentan situar el fenómeno de la vida en el marco de la comprensión teórica de la naturaleza que existía en su época. Conjuntamente, los ensayos despliegan una amplia gama de principios explicativos y marcos de referencia. Los principios explicativos de Aristóteles son sus cuatro “causas” (véase *infra*). Descartes se propuso explicar dentro de un marco puramente físico y mecanicista todos los fenómenos de la vida, con frecuencia postulando entes y procesos micromecánicos invisibles. Kant llegó a la conclusión de que el marco puramente mecanicista de Descartes nunca podría explicar la intencionalidad autónoma de la vida. Como dice Mayr en el capítulo VI, los vitalistas concibieron la existencia de sustancias o fuerzas vitales no físicas para explicar las propiedades distintivas de la vida. Schrödinger enfocó la manera en que el metabolismo de la vida sustenta una organización compleja y robusta ante la segunda ley de la termodinámica. También predijo la forma en que el ADN y el ARN gobiernan los procesos metabólicos, y cómo este control se hereda cuando la vida se reproduce. Tanto Oparin como Gánti intentaron entender cómo las formas de vida más simples y primitivas pudieron surgir de sustancias no vivientes.

A diferencia de algunos trabajos contemporáneos, los estudios clásicos en esta parte típicamente ignoran las cuestiones metodológicas sobre la forma adecuada de evaluar las explicaciones de la naturaleza de la vida. Claro está, aunque no *examinan* las metodologías, los estudios no dejan de *manifestarlas*. Estas metodologías abarcan las preconcepciones culturales y los análisis conceptuales vulgares, tanto como las investigaciones empíricas de los fundamentales mecanismos biológicos, químicos y físicos. Los ejemplos expuestos por estos autores suscitan cuestionamientos concretos respecto a la metodología adecuada para la investigación de la naturaleza de la vida. Esta cuestión vuelve a aparecer en las sucesivas partes de este libro, especialmente en la cuarta.

Para concluir este resumen del material de la primera parte, a continuación aparecen los breves historiales y biografías de los autores de cada uno de los capítulos.

ARISTÓTELES

Mejor conocido como filósofo, Aristóteles (384-322 a. C.) también fue uno de los primeros científicos de la Antigüedad. A diferencia de su maestro Platón, Aristóteles hizo hincapié en la importancia de la observación en la teorización sobre el mundo. Le fascinaba especialmente la vida y a su estudio le dedicó un tiempo considerable. Su devoto alumno, Alejandro Magno, al parecer le enviaba los animales exóticos que se encontraba en el curso de sus conquistas. Los escritos de Aristóteles sobre la ética y la metafísica se basan ampliamente en sus estudios de biología, y viceversa. El texto de Aristóteles seleccionado para esta sección ha sido tomado de su obra *De anima*, título a veces traducido como *Acerca del alma*.

Aristóteles establece las condiciones para los sucesivos debates sobre la naturaleza de la vida que aparecen en el capítulo I de esta obra, diferenciando el “reino mineral [inanimado]” del “reino animal y vegetal” y “definiendo” la vida funcionalmente con referencia a sus capacidades o poderes, así como a lo que él llamaba su “alma” (la capacidad para una serie de actividades). No se puede entender la noción del alma que tenía Aristóteles independientemente de su teoría de la explicación. Aristóteles distingue los cuatro tipos diferentes de factores que sería posible citar en una explicación: el material, el eficiente, el formal y el final. Estos factores explicativos han sido denominados tradicionalmente “causas”, pero este término puede ser muy ambiguo porque difiere de lo que entendemos por causas hoy en día. La causalidad eficiente ha sobrevivido hasta la fecha; es la activadora causal (por ejemplo, pulsar el interruptor de la luz) que produce un efecto (la iluminación en una habitación). También seguimos aceptando las causas materiales, por ejemplo, la tendencia de una copa de vino a estrellarse si cae al suelo. Sin embargo, para Aristóteles las capacidades que diferencian la vida de la materia inanimada involucran en forma determinante la causación formal (que constituye la *esencia* de una cosa) y la causación final (que constituye su *finalidad* natural), ninguna de las cuales tiene una analogía exacta en la ciencia moderna. Para saber más sobre lo que Aristóteles entiende por la causación y la explicación, véase su *Física*, libro II, sección 3. (Aquellos que no conocen a fondo la filosofía pueden encontrar en Falcon² un examen accesible de las muy complejas ideas de Aristóteles sobre la causación y la explicación.)

² A. Falcon, “Aristotle on Causality”, en E. N. Zalta, *The Stanford Encyclopædia of Philosophy*, edición de otoño de 2008. Disponible en <<http://plato.stanford.edu/archives/fall2008/entries/aristotle-causality/>> (consultado en febrero de 2009).

Para Aristóteles, una cosa sólo está viva si posee cierto tipo de “alma”. Es importante entender que lo que Aristóteles llama “alma” es muy diferente de la noción teológica cristiana del alma. El alma de Aristóteles no es un espíritu incorpóreo, sino una serie de capacidades animadoras producidas por ciertas facultades internas naturales.³ Según Aristóteles, tanto las plantas como los animales poseen alma. Aristóteles centró especialmente su atención en las capacidades de la nutrición, la percepción, la locomoción y el pensamiento. Dos de las capacidades fundamentales de la vida involucran la mente: la sensación y el pensamiento racional. Así, para Aristóteles cualquier cosa que posea una mente tiene que estar viva. Hoy en día, ciertas teorías que postulan conexiones todavía más profundas entre la vida y la mente (véase, por ejemplo, Thompson)⁴ representan un pequeño renacimiento aristotélico.

Las cualidades que Aristóteles asociaba a la vida son multifacéticas. Por ejemplo, la nutrición implica la capacidad de crecer y reproducirse; la percepción implica la capacidad para el placer, el dolor, el deseo, y los apetitos; el pensamiento implica la comprensión, la razón, y la imaginación. Hay varios tipos de dependencias entre estas capacidades. Aristóteles pensaba que las capacidades más vitales y fundamentales son la (auto)nutrición y la reproducción; todas las formas de vida (tanto las vegetales como las animales) las poseen, y algunas (por ejemplo, los seres humanos) poseen capacidades adicionales (las que forman el alma “racional”). Aristóteles alegaba además que la reproducción es más básica que la nutrición. Sus escritos se adelantaron a los debates contemporáneos en torno a si el metabolismo o la replicación es la propiedad más fundamental de la vida; véase, por ejemplo, L. Orgel (capítulo VIII), R. Shapiro (capítulo IX), N. Pace (capítulo XI), M. A. Boden (capítulo XVIII), R. Dawkins (capítulo XXIX), S. Kauffman (capítulo XXX) y M. A. Bedeau (capítulo XXXI).

RENÉ DESCARTES

El gran filósofo francés del siglo XVII, René Descartes (1596-1650) es fundamental en la filosofía moderna, tanto como en las matemáticas. Fue él quien desarrolló el sistema cartesiano de coordenadas en la geometría analítica que permite representar las formas geométricas en forma algebraica. Además, su participa-

³ G. B. Matthews, “Aristotle on Life”, en M. C. Nussbaum y A. O. Rorty (comps.), *Essays on Aristotle's De Anima*, Clarendon Press, Oxford, 1996, pp. 185-193.

⁴ E. Thompson, *Mind in Life. Phenomenology and the Sciences of the Mind*, Harvard University Press, Cambridge, 2007.

ción en la invención del cálculo resultó crucial. Los escritos de Descartes representaron un papel fundamental en la caída de la escolástica filosófica y científica de la escuela aristotélica. De hecho, se le conoce comúnmente como el “padre de la filosofía moderna”. Además de sus trabajos filosóficos y matemáticos, Descartes hizo contribuciones importantes a diversos campos de la ciencia. En sus ideas sobre la naturaleza de la vida influyó de manera importante su investigación detallada de la psicología animal. El capítulo II de esta obra incluye *El tratado del hombre*, su más extensa exposición de la naturaleza de la vida.

Rompiendo con Aristóteles, Descartes hizo una distinción radical entre la mente (“el alma racional”) y la vida (“el cuerpo”). Son profundos sus argumentos para esta diferenciación y no se apoyan en la ciencia limitada de su tiempo. Fueron responsables del notorio “problema de la mente-cuerpo” que todavía hoy preocupa a muchos filósofos.

Es más fácil leer a Descartes que a Aristóteles, en gran parte porque Descartes estableció las bases filosóficas de la ciencia moderna. Habiéndose formado un concepto de la ciencia que posteriormente retomaría la física newtoniana, él rechazó toda invocación de la finalidad —natural o divina— en su explicación de los fenómenos naturales. Para Descartes, la naturaleza de los sistemas vivientes (“cuerpos”) no difiere de la de los aparatos mecánicos, tales como los relojes y las fuentes; al igual que éstos, aquéllos pueden entenderse totalmente con base en la causación eficiente, a saber, la interacción de diferentes partes corporales (órganos, músculos, tendones). En una palabra, los sistemas vivientes sólo son máquinas. Siguen siendo populares hoy ciertas versiones de esta idea de la vida. Los biólogos moleculares contemporáneos tienden a caracterizar los organismos como “máquinas” moleculares complejas (véanse los capítulos de la segunda parte). Además, algunas vertientes (“duras”) de la vida artificial consideran que son formas de vida algunas máquinas hechas con piezas mecánicas y electrónicas.

IMMANUEL KANT

El gran académico alemán Immanuel Kant (1724-1804) tuvo una amplia formación científica y filosófica e hizo importantes aportaciones a ambas disciplinas. Su contribución a la astronomía, que incluyó la formulación de la hipótesis nebular y la deducción de que la Vía Láctea y posiblemente otras nebulosas son enormes discos de estrellas, es fundamental en la astronomía moderna. Es más famoso, sin embargo, por sus escritos filosóficos. Sus tratados sobre la vida se

encuentran en la *Crítica del juicio*, del cual han sido extraídos los pasajes que aparecen en el capítulo III de esta sección.

En el siglo XVIII se pensaba que la física newtoniana era el fundamento de toda la ciencia. Sin embargo, Kant llegó al convencimiento de que aquélla no podía explicar la vida. Se distanció de Descartes, alegando que un organismo (un “ser organizado”) no es una mera máquina (“artefacto”). Aunque los organismos tienen en común con los artefactos la apariencia de haber sido diseñados inteligentemente, se diferencian de los artefactos de un modo fundamental: son “fines naturales” (autocausados, en vez de externamente causados). El alegato de Kant representa un regreso a la idea aristotélica de que la vida implica un tipo especial de causación, la intrínseca finalidad natural.

Los escritos de Kant son notoriamente difíciles de comprender, y los estudiosos de Kant no se ponen de acuerdo sobre su interpretación. Kant a veces dice que los organismos *son* fines naturales y a veces sólo dice que deben ser por nosotros “considerados” como tales. Además, parecen contradecirse entre sí sus afirmaciones sobre las finalidades naturales; por ejemplo, su aserción de que debemos tratar de explicar *todo* en la naturaleza desde el punto de vista de la mecánica. Según la interpretación más extensamente aceptada, Kant sólo asevera que la mente humana no es capaz de *comprender* (y, por ende, de *explicar* científicamente) como aparatos mecánicos a los organismos. Pero esto no significa que no sean *de hecho* como tales. En esta interpretación, los aspectos teleológicos de la vida son un producto de las limitaciones del intelecto humano y no un rasgo objetivo de un mundo natural independiente de la mente.

Parece claro que Kant intentaba reconciliar las propiedades teleológicas de la vida con la ciencia de su época. Sus sucesores asumieron el reto de la empresa. Aceptaron que los aspectos teleológicos de la vida no pueden explicarse en el marco de la física clásica, pero dudaban en atribuirlos a lo que equivale ser un defecto del intelecto humano. Así que buscaron una solución en las nuevas teorías y desarrollos científicos, tales como la teoría darwiniana de la evolución mediante la selección natural, la física y la química del siglo XX, e incluso las matemáticas (la teoría de la complejidad y la teoría del caos). Para una revisión de las perspectivas contemporáneas respecto a la teleología natural, véase Allen y sus colegas.⁵

⁵ C. Allen et al., *Nature's Purposes: Analyses of Function and Design in Biology*, MIT Press, Cambridge, 1998.

ERWIN SCHRÖDINGER

Científico austriaco, Erwin Schrödinger (1887-1961) ganó el Premio Nobel en 1933 por su creación de la ecuación Schrödinger, uno de los principios centrales de la mecánica cuántica. A él también le fascinaba la vida. Publicó en 1944 *¿Qué es la vida?*, libro hoy clásico que surgió de una serie de conferencias públicas que impartió en Irlanda durante la segunda Guerra Mundial. Algunos pasajes claves de esta obra aparecen en el capítulo iv. Schrödinger creía que los aspectos teleológicos de la vida podían explicarse mediante los conceptos y principios de la física no clásica, especialmente los de la termodinámica y la mecánica cuántica. Además de anticipar la estructura de la “sustancia hereditaria” (la molécula de ADN) en la forma de un “cristal aperiódico”, Schrödinger planteó provocativamente la necesidad de nuevos principios termodinámicos para entender los aspectos de la voluntariedad vital, que él identificó con la habilidad que los organismos individuales tienen para sustentar el orden mediante la extracción de la energía de su entorno (es decir, el metabolismo). Sus especulaciones sobre la importancia del metabolismo en la vida se han reconsiderado en años recientes (por ejemplo, véase Boden en el capítulo xviii), y son la inspiración de los intentos de explicar la vida con conceptos muy lejanos a los de los sistemas equilibrados y las estructuras disipativas; un buen ejemplo de esto se encuentra en Kauffman (capítulo xxx), quien propone una cuarta ley de la termodinámica como algo imprescindible para entender la vida.

ALEXANDER OPARIN

A. I. Oparin (1894-1980), bioquímico ruso, es el padre de las explicaciones metabólicas basadas en la “proteína primordial”. Oparin creía que un sistema genético capaz de evolucionar mediante la selección natural no podía haber aparecido a menos de que hubiera existido previamente un primitivo sistema metabólico. Por lo tanto se oponía a las explicaciones del origen de la vida basadas en los “genes primordiales”; véase Shapiro (capítulo ix) para un examen contemporáneo de esta postura en el contexto de la actualmente popular teoría del mundo de ARN (versión de los “genes primordiales”). Las ideas de Oparin evolucionaron en el curso de su vida. El capítulo v de la primera parte ha sido extraído de *La vida*, libro que escribió al final de su vida.

Al igual que Kant, Oparin rechaza la analogía de la máquina en relación con

la vida. También se opone terminantemente al vitalismo. Oparin alega que la complejidad organizativa y la voluntariedad son las propiedades más esenciales de la vida, enfatizando que no es posible explicarlas desde el punto de vista de la química del siglo xx. Oparin cree que las posibilidades moleculares de la vida se limitan a los compuestos de carbón. (Los capítulos de la segunda parte exponen los últimos desarrollos científicos en este campo de investigación.) Según Oparin, la vida se desarrolló en la Tierra mediante la gradual evolución química de los compuestos orgánicos (basados en el carbono) a partir de una “sopa primordial” que consistía en moléculas orgánicas más sencillas. Ya que el genetista y biólogo evolucionista J. S. B. Haldane⁶ propuso una hipótesis similar aproximadamente en la misma época en que Oparin desarrolló por primera vez estas ideas, su teoría ha llegado a conocerse como la “hipótesis Oparin-Haldane”. Oparin fue uno de los primeros en afirmar que una teoría de la naturaleza de la vida no se puede separar de una teoría del origen de la vida. Según él, la comprensión de la naturaleza de la vida presupone la transición desde un conjunto no viviente de moléculas orgánicas hasta un sistema químico viviente, idea que equivale a comprender cómo la vida se origina a partir de sustancias químicas no vivientes.

ERNST MAYR

Nacido en Alemania, el biólogo evolucionista Ernst Mayr (1904-2005) emigró a los Estados Unidos cuando tenía poco más de 20 años. Mayr desempeñó un papel clave en el desarrollo de la moderna síntesis evolutiva de la selección natural darwiniana y la genética mendeliana. Una de sus contribuciones importantes fue la redefinición del concepto de especie, que anteriormente se basaba en las similitudes morfológicas, en el de un grupo de individuos que se reproducen entre sí dentro de un aislamiento reproductivo.

A Mayr también le interesaba la cuestión más general de lo que distingue a la vida de la no vida. Al igual que Kant y Oparin, Mayr rechazó la analogía de la máquina, oponiéndose, como Oparin, al vitalismo. El capítulo vi de esta primera parte ha sido tomado de un libro, *This is Biology*, que él escribió para el gran público en la última etapa de su vida. Esta obra contiene una extensa exposición de la historia del vitalismo y del mecanicismo, así como un examen de las obras de Kant, de Haldane (cuyas ideas son muy similares a las suyas) y de Schrödinger,

⁶ J. B. S. Haldane, “What is Life?”, *Adventures of a Biologist*, Macmillan, Nueva York, 1937, pp. 49-64.

donde señala sus equivocaciones, tanto como sus aciertos. Por lo tanto, el capítulo de Mayr en esta sección proporciona un interesante examen de las ideas en torno a la vida en el siglo XIX y la primera mitad del siglo XX, desde el punto de vista de un biólogo. Según Mayr, las “características de los organismos vivientes que los distinguen categóricamente de los sistemas inanimados” son las capacidades de 1) la evolución, 2) la autorreproducción, 3) el crecimiento y la diferenciación mediante un programa genético, 4) el metabolismo, 5) la autorregulación, 6) la reacción ante los estímulos del medio ambiente, y 7) el cambio tanto en el nivel fenotípico como en el genotípico. A diferencia de Oparin, Mayr piensa que ciertas características distintivas de la vida (tales como la organización jerárquica y la voluntariedad) no se pueden explicar totalmente desde el punto de vista de los mecanismos físico-químicos en el nivel molecular. Mayr dice que estas características especiales de la vida literalmente “emergen” *de novo* en los niveles superiores de la organización y la integración; no es posible “reducirlas al” o “predeterminarlas del” conocimiento de los elementos de sus niveles inferiores. Así, Mayr cree que es posible darle un adecuado sentido científico a la idea intuitiva de que un organismo, en su totalidad, es más que la suma de sus partes.

Conocida como *organicismo*, la explicación de Mayr distingue entre la vida y la “materia inerte”, partiendo de las características organizativas. A diferencia de Oparin, no restringe la vida a compuestos orgánicos; la clave de la vida es su organización química y no su composición química. El organicismo se enfrenta al problema de darle un buen sentido científico al misterioso concepto de la “emergencia” sin caer en algo que se parezca demasiado al vitalismo. Algunos han buscado una solución a este problema en la teoría de la complejidad, un campo relativamente nuevo de investigación interdisciplinario que ha surgido de la ciencia computacional teórica y de las matemáticas. Para una compilación de perspectivas filosóficas y científicas recientes en torno a la emergencia, incluidas las basadas en la actual investigación de los sistemas complejos, véase Bedau y Humphreys.⁷

TIBOR GÁNTI

El ingeniero químico húngaro Tibor Gánti (1933-2009) ha hecho muchas contribuciones a nuestra comprensión de la naturaleza de la vida que no se han valorado

⁷ M. A. Bedau y P. Humphreys (comps.), *Emergence. Contemporary Readings in Philosophy and Science*, MIT Press, Cambridge, 2008.

debidamente. Una reciente compilación⁸ de sus ensayos más importantes es la fuente del séptimo y último capítulo de esta parte. Aunque las propiedades distintivas de la vida que él propone son similares a las que otros han expuesto, en las suyas hay algunas diferencias significativas. Es interesante compararlas, por ejemplo, con las de la lista de Mayr. Una novedad es que Gánti divide las propiedades de la vida en dos categorías: los criterios de la vida *absolutos*, que son necesarios y suficientes para la vida de los organismos individuales, y los criterios de vida *potenciales*, que sólo son necesarios para la multiplicación y sustentación de la vida en un planeta. Como lo descubrirá el lector, esta distinción le otorga a Gánti los recursos conceptuales tanto para afirmar que un ente puede estar vivo y que sin embargo puede no formar parte de un sistema evolutivo, como para coincidir con Oparin y Mayr en que la capacidad de evolucionar es esencial en la adaptación al medio ambiente y en la diversificación.

Las ideas de Gánti sobre la naturaleza de la vida se sustentan en su experiencia como químico, y él hace hincapié en los requerimientos químicos de la vida. Pero ya que pretende formular una concepción de la vida que sea ampliamente aplicable, su análisis químico es abstracto y funcional. El resultado es su célebre modelo del chemoton. Este modelo describe la vida celular química mínima como una red autocatalítica (autosustentable) que integra tres tipos de subsistemas químicos: un metabolismo, un contenedor y un programa químico hereditario. Puesto que Gánti no restringe la vida a los compuestos orgánicos, el modelo del chemoton representa una perspectiva del metabolismo primordial pero no de la proteína primordial (véase la introducción a la segunda parte). Los tres subsistemas no pueden funcionar por separado, y cooperan entre sí para crear un todo unificado que es capaz de mostrar las propiedades distintivas de la vida. Tríadas químicas más o menos similares se presuponen en muchas investigaciones experimentales y teóricas contemporáneas sobre la creación de nuevas formas de vida en el laboratorio,⁹ aunque el énfasis de Gánti en el acoplamiento estequiométrico de la tríada funcional generalmente se desecha, enfatizándose el programa interno.

⁸ T. Gánti, *The Principles of Life*, introd. de J. Grisemer y E. Szathmáry, Oxford University Press, Nueva York, 2003.

⁹ S. Rasmussen *et al.*, "A Roadmap to Protocells", en S. Rasmussen, M. A. Bedau, L. Chen *et al.* (comps.), *Protocells. Bridging Nonliving and Living Matter*, MIT Press, Cambridge, 2008, pp. 71-100.

BIBLIOGRAFÍA

- Allen, C., M. Bekoff y G. V. Lauder (comps.), *Nature's Purposes: Analyses of Function and Design in Biology*, MIT Press, Cambridge, 1998.
- Bedau, M. A., y Paul Humphreys (comps.), *Emergence. Contemporary Readings in Philosophy and Science*, MIT Press, Cambridge, 2008.
- Falcon, A., "Aristotle on Causality", en E. N. Zalta, *The Stanford Encyclopædia of Philosophy*, plato.stanford.edu, edición de otoño de 2008.
- Gánti, T., *The Principles of Life*, introd. de James Grisemer y E. Szathmáry, Oxford University Press, Nueva York, 2003.
- Haldane, J. B. S., "What is Life?", en *Adventures of a Biologist*, Macmillan, Nueva York, 1937, pp. 49-64.
- Matthews, G. B., "Aristotle on Life", en M. C. Nussbaum y A. O. Rorty (comps.), *Essays on Aristotle's De Anima*, Clarendon Press, Oxford, 1996, pp. 185-193.
- Maturana, H., y F. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, Reidel, Londres, 1980. [Versión en español: *De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: la organización de lo vivo*, Editorial Universitaria, Santiago de Chile, 2006.]
- Rasmussen, S., M. A. Bedau, J. S. McCaskill y N. H. Packard, "A Roadmap to Protocells", en S. Rasmussen, M. A. Bedau, L. Chen *et al.* (comps.), *Protocells. Bridging Nonliving and Living Matter*, MIT Press, Cambridge, 2008, pp. 71-100.
- Thompson, E., *Mind in Life. Phenomenology and the Sciences of the Mind*, Harvard University Press, Cambridge, 2007.
- Wheeler, M., *Reconstructing the Cognitive World: The Next Step*, MIT Press, Cambridge, 2007.

Aristóteles

I. ACERCA DEL ALMA* (*Fragmentos*)

I

Basta con lo dicho sobre las doctrinas transmitidas por los que nos precedieron acerca del alma. Emprendamos un nuevo comienzo e intentemos determinar qué es el alma y cuál sería su definición más general. Hablamos de “sustancia” como de un género de lo que es, y de ésta en un sentido como materia, lo que por sí mismo no es un “esto”, en otro sentido la configuración o, más precisamente, la forma, en virtud de la cual ya se dice un “esto” y, en tercer lugar, lo que se compone de ambas cosas.¹ La materia es potencia, en tanto que la forma es actualidad, y esto último se entiende de dos maneras: *i*) en un sentido, como el conocimiento; en otro, *ii*) como el ejercicio [de dicho conocimiento]. Parecen ser sustancias sobre todo los cuerpos² y, entre éstos, los naturales, pues ellos son principios de los demás. Entre los cuerpos naturales, algunos tienen vida, otros no la tienen. Llamamos “vida” a la autonutrición [de un ser vivo], al crecimiento y al decrecimiento. Todo cuerpo natural que participa de la vida, por lo tanto, será una sustancia, y una sustancia entendida en el sentido de compuesto. Pero puesto que también hay un cuerpo de tal tipo —*i. e.*, que tiene vida—, el alma no será un cuerpo, pues el cuerpo no se encuentra entre lo que [se dice] de un sustrato, sino que más bien es como un sustrato, es decir, materia. Es forzoso, entonces, que el alma sea una sustancia en el sentido de forma de un cuerpo natural que en potencia tiene vida. Pero la sustancia es una actualidad; por lo tanto, es la actualidad de un cuerpo de tal índole. Dicha actualidad se dice de dos modos: *i*) como el conocimiento y

* Lib. II, 1-4. Versión en español tomada del libro *Acerca del alma*. *De anima*, trad., notas, pról. e introd. de M. D. Boeri, Colihue, Buenos Aires, 2010, pp. 57-78. La edición en inglés retomó el texto de Aristóteles, *De Anima*, trad. y notas de C. Shields, Oxford University Press, Oxford (en prensa).

¹ Éstos son los tres significados básicos de *ousía* en Aristóteles; como se ve en seguida, el alma únicamente puede ser *ousía* (sustancia) en el sentido de “forma”. Para el “alma” como *ousía* en el sentido de “causa del ser” (y como lo que no se dice de un sujeto), cf. *Metafísica*, 1017a15-16.

² Cf. *Metafísica*, VII, 7-8.

ii) como el ejercicio [de ese conocimiento]. Es evidente, entonces, que [el alma es una actualidad] en el sentido del conocimiento, pues la existencia del sueño y la vigilia presuponen la existencia del alma, y la vigilia es análoga al ejercicio del conocimiento, en tanto que el sueño, a tener y no ejercitar [dicho conocimiento].³ El conocimiento es anterior en cuanto a su generación en el mismo [individuo].⁴ Por lo cual, el alma es la actualidad primera de un cuerpo natural que en potencia tiene vida.⁵ Y es de tal índole el que es orgánico.⁶ Las partes de las plantas, a pesar de que son completamente simples, también son órganos; por ejemplo, la hoja es la protección del pericarpio, y el pericarpio lo es del fruto. Y las raíces son análogas a una boca [de un animal], pues ambas cosas absorben el alimento. Si, efectivamente, hay que mencionar una [característica] común en todo tipo de alma, ésta

³ O sea, el alma es una “actualidad primera”, i. e., la facultad o capacidad de ejercer una actividad.

⁴ Es decir, la posesión del conocimiento es anterior a su ejercicio por parte del individuo.

⁵ El griego *physikón* puede significar tanto “físico” como “natural”; que este último significado es el apropiado en este contexto lo muestra el hecho de que, aunque un cuerpo como una piedra es un cuerpo físico, no es, sin embargo, un cuerpo que en potencia tenga vida (i. e., un cuerpo que sea capaz de desplegar poderes anímicos como alimentarse, tener sensación o pensar). El problema es que Aristóteles tiene una sola palabra para decir las dos cosas, pero en el contexto no cabe duda de que “físico” es mucho más amplio que “natural”: aunque todo cuerpo natural es un cuerpo físico, no todo cuerpo físico es un cuerpo natural.

⁶ Aunque algunos intérpretes argumentan que en Aristóteles *organikón* nunca significa “orgánico”, sino “instrumental” (cf. A. P. Bos, “Aristotle’s Psychology: The Traditional (Hylomorphic) Interpretation Refuted”, p. 3; “Why the Soul Needs an Instrumental Body According to Aristotle (*De Anima*, I, 3, 470b13-26)?”, p. 25, y “‘Aristotelian’ and ‘Platonic’ Dualism in Hellenistic and Early Christian Philosophy and in Gnosticism”, pp. 278-279), no veo cómo en este pasaje la palabra podría significar “instrumental”. Bos propone interpretar la definición de *psyché* de *Acerca del alma*, 412b5-6, de la siguiente manera: “es la entelequia primera de un cuerpo natural *elemental* que en potencia posee vida y que es el instrumento del alma” (A. P. Bos, “Aristotle’s Psychology...”, p. 4; el destacado en *elemental* es mío. Cf. también A. P. Bos, “‘Aristotelian’ and ‘Platonic’ Dualism...”, p. 278, donde argumenta que en Aristóteles “cuerpo natural” nunca es el cuerpo de una criatura viviente, sino siempre un “cuerpo elemental”). Pero esta interpretación tiene un escollo sistemático decisivo: según Aristóteles, los elementos son inanimados, es decir, *no* tienen alma (cf. *Física*, VIII, 4, 254b33-255a30). Una solución intermedia sería interpretar *organikón* como “organizado” (ésta es la salida de J. A. Smith en su traducción *Acerca del alma*, 412a28b1. Pero en la línea siguiente traduce *órgana* por “organs”, que sin duda es la traducción correcta). Lo que me parece importante señalar es que en el contexto es bastante obvio que Aristóteles cree que *organikón* y *órgana* son prácticamente lo mismo. Ahora bien, una cama o un hacha —para poner un par de ejemplos típicos de artefactos aristotélicos—, aunque son sistemas “organizados”, no son sistemas *orgánicos* en el sentido de un ente capaz de desplegar poderes anímicos o vitales como aquellos en los que está pensando Aristóteles: alimentarse, crecer, decrecer, experimentar estados afectivos de dolor o placer, sensaciones y, eventualmente, pensar. En contra de Bos puede citarse el pasaje de *De respirazione*, 176a18-19, donde *órganon* claramente significa “órgano”, pues el ejemplo de Aristóteles allí es “lengua” (cf. también 474b18). Creo que se trata de un pseudoproblema: *órganon* puede significar tanto “instrumento” como “órgano”, y es claro que, al menos en algunos pasajes, Aristóteles saca provecho de esta ambigüedad: un *órganon* en el animal es un “instrumento biológico”, algo que sin duda nunca puede ser un hacha o una cama, que solamente son instrumentos artificiales.

sería que [el alma] es la actualidad primera de un cuerpo natural orgánico.⁷ Es por eso también que no hay que investigar si el alma y el cuerpo son una sola cosa, como tampoco si lo son la cera y la figura [que en ella se graba], ni en general la materia de cada cosa y aquello de lo cual es materia. Pues [aun cuando] “uno” y “ser” se dicen de muchas maneras, la actualidad es lo que [se dice “uno” y “ser”] en sentido estricto.

Ahora bien, se ha dicho en general qué es el alma, pues es sustancia en el sentido de forma,⁸ y eso es el “qué era ser” de un cuerpo de tal tipo. Es como si se supusiera que un instrumento como un hacha fuera un cuerpo natural. El “ser hacha” sería su sustancia y eso sería su alma. Y una vez que esta estuviera separada, ya no habría hacha, a no ser en sentido homónimo, pero ahora es un hacha. Pues no es de un cuerpo de este tipo que el alma es el “qué era ser”, es decir, la explicación formal, sino de un cuerpo natural de tal tipo que tiene el principio del movimiento y del reposo en sí mismo. Debemos considerar lo dicho también en el caso de las partes,⁹ pues si el ojo fuera un animal, su alma sería la vista. Ésta es, en efecto, la sustancia del ojo, [sustancia] en cuanto forma. Pero el ojo es la materia de la vista; cuando la vista es removida, el ojo ya no es ojo, a no ser en sentido homónimo, como el [ojo] de piedra o el pintado.¹⁰ Hay que aplicar, claro está, lo dicho de la parte a la totalidad del cuerpo viviente. Pues de manera análoga a como la parte se da respecto de la parte, así también la sensación en su totalidad se da respecto de todo el cuerpo que siente en cuanto tal. No es lo que ha perdido su alma lo que tiene la capacidad de vivir, sino lo que la tiene. El esperma [en los animales] y el fruto [en las plantas] es lo que en potencia es un cuerpo de tal tipo. Ahora bien, tal como el corte [en el caso del hacha] y la visión [en el del

⁷ Esta definición presenta no pocos problemas; algunos de ellos han sido analizados por Charlton, 1995; la primera de dichas dificultades tiene que ver con el hecho de que la definición comienza con una cláusula condicional. Si la definición de cualquier término debe captar o incluir lo que es común a todo aquello a lo que se aplica, no hay razón para introducir esa prótasis condicional (W. Charlton, “Aristotle’s Definition of Soul”, p. 244). No creo, en cambio, como Charlton, que esté de más la introducción del adjetivo “primera” calificando a “actualidad”; como se había aclarado antes (412a10-11), “actualidad”, dicho del alma, debe entenderse en el primer sentido de “actualidad”, es decir, como una capacidad.

⁸ La expresión griega es *he katà tòn logón y lógos* tiene su significado habitual de “forma” (para un uso similar de *lógos*, cf. *infra*, 415b14-15, y *Física*, 200a14-15).

⁹ ¿Las partes del cuerpo o las del alma? Hicks cree que deben ser las partes del cuerpo (cf. Aristóteles, *De anima*, trad. de R. D. Hicks, Cambridge University Press, Cambridge, 1907, p. 317), pues antes habló de las partes del cuerpo como *órgana* y las definió por sus funciones. El ejemplo que viene a continuación (“ojo”) claramente indica que está pensando en partes corpóreas. Creo además que es posible que Aristóteles esté retomando lo que ha dicho antes al hablar de “las partes de las plantas” (en 412b1; véase también 416a4-5).

¹⁰ O sea, para que un órgano sensorio como un ojo sea efectivamente un órgano sensorio debe estar animado; si no lo está, no funciona como un ojo y, por ende, no es un ojo en sentido propio.

ojo], así también la vigilia es una actualidad; el alma, en cambio, lo es tal como la vista y la capacidad del órgano.¹¹ El cuerpo, por su parte, es lo que es en potencia; pero tal como un ojo es la pupila y la vista, también en este caso el alma y el cuerpo *son* el animal. Por lo tanto, que el alma no es separable del cuerpo, o algunas partes del alma, si es que por naturaleza es divisible, es evidente. Pues la actualidad de algunas de ellas es la de las partes mismas. Sin embargo, nada impide que algunas [partes sean separables] ya que no son actualidades de ningún cuerpo. Más aún, no es claro si el alma es la actualidad de un cuerpo en este sentido como el marinero de la nave.¹²

Quede determinado de esta manera y de un modo esquemático nuestro esbozo sobre el alma.

II

Dado que lo que es claro y más cognoscible en un sentido conceptual procede de lo que es oscuro pero más evidente, hay que procurar encaminarse así de nuevo al examen del alma.¹³ Pues el enunciado definidor no sólo debe mostrar el hecho

¹¹ Es decir, el alma es una “actualidad primera”, o sea, una actualidad en el sentido de capacidad o facultad.

¹² En realidad, el alma no puede ser una actualidad como el marinero en la nave. Si lo fuera, el alma podría ser confundida con un ítem corpóreo (*quod non* en opinión de Aristóteles). Miguel de Éfeso (citando como propio un pasaje de *De anima*, 79, 19-20, de Alejandro de Afrodisia) retoma la analogía para argumentar que “el alma en nosotros no es como el remero en la nave, sino que es una cierta forma y perfección” (Miguel, *In librum de animalium motione*, 116, 9-10). Alejandro es incluso mucho más enfático cuando argumenta que el único caso en el que el marinero de la analogía aristotélica sería viable es aquel en el que el piloto se puede identificar con el arte de pilotear (*téchne kuberneliké*) una nave. En ese caso únicamente el alma podría estar en el cuerpo como “un estado y una forma en la materia” (Alejandro, *De anima*, 15, 10-12). El arte del pilotaje es diferente del piloto mismo: en tanto éste es un compuesto y, por ende, un ítem material, aquel es una forma.

¹³ Al comienzo de *Física*, I, 1, Aristóteles argumenta que no es lo mismo cognoscible para nosotros que cognoscible por sí o en sentido absoluto. Esta distinción debe entenderse en el sentido de que lo que en un primer momento (*próton*) es claro y evidente para nosotros son los compuestos, las cosas particulares de nuestra experiencia sensible; éste es un modo apropiado de entender la aparente paradoja de este pasaje de *Acerca del alma*, donde algo puede “ser más oscuro” y al mismo tiempo “evidente” (413a11: *ek tòn asaphòn mèn phanerotéron*): es más oscuro porque lo que conocemos del objeto no son sus principios explicativos, pero a la vez es “evidente” porque se hace de manifiesto en la percepción sensible. Sólo en una segunda instancia (*hýsteron*) y a partir de tales cosas se nos hacen cognoscibles los elementos y los principios que distinguen y, consecuentemente, explican tales objetos (cf. *Física*, 184a19-23). Dicho de otro modo, las cosas del mundo sensible son, en el orden del tiempo, primeras para nosotros, pero en el orden de la fundamentación o de la explicación son posteriores a nuestra percepción, porque no percibimos los elementos que explican los fenómenos de modo directo, sino en un momento posterior y a partir de tales fenómenos. Aquí se distinguen dos sentidos de “primero”: uno estrictamente temporal (en el sentido de que aparece primero —a nuestra percepción— en el tiempo), y otro ontológico que tiene que ver con la fundamentación del objeto: si A explica o fundamenta a B, A es anterior a B. Éste, como se ve,

—como dice la mayor parte de las definiciones—, sino que [en él] también tiene que darse y hacerse evidente la causa.¹⁴ Sin embargo, los enunciados de las definiciones de ahora son como conclusiones; por ejemplo, ¿qué es la cuadratura? Que un rectángulo equilátero sea igual a uno que no es equilátero. Pero una definición de este tipo es el enunciado de una conclusión. En cambio, la que dice que la cuadratura es el descubrimiento del medio [proporcional] expresa la causa de la cosa. Ahora bien, habiendo tomado un nuevo punto de partida de nuestra investigación, decimos que lo animado se distingue de lo inanimado por vivir. Sin embargo, “vivir” se dice de muchas maneras, y sostenemos que algo vive únicamente si uno de estos [factores] se da [en ello]: intelecto, sensación, movimiento y reposo según el lugar, y además el movimiento que se da en el proceso de alimentación, decaimiento y también crecimiento.¹⁵ Es por eso que también todas las plantas parecen estar vivas, pues evidentemente tienen en sí mismas una facultad y un principio en virtud de los cuales admiten no sólo crecimiento sino también decaimiento según lugares opuestos, pues no crecen hacia arriba sin hacerlo hacia abajo, sino que crecen de modo similar en ambas direcciones y en todas direcciones. Es el caso de todo lo que siempre se alimenta y vive de un modo continuo en tanto sea capaz de obtener alimento. Este [tipo de vida] puede darse separadamente de los demás, pero los demás, en el caso de los seres mortales, no pueden darse sin él.¹⁶ Esto es evidente en las plantas, pues ellas no tienen ninguna otra facultad del alma.¹⁷ Vivir, por tanto, se da en los animales debido a este principio, y el animal lo es prioritariamente a causa de la sensación, pues incluso a las cosas que no se mueven ni cambian de lugar pero tienen sensación las llamamos “ani-

es un sentido de “primero” muy cercano a la llamada “prioridad ontológica”, porque aquello que puede existir independientemente de otras cosas es fundamento de lo no eterno y corruptible, y puede llamarse con propiedad “anterior a” las demás cosas. Pero, de acuerdo con las distinciones que encontramos en otros tratados aristotélicos, esto no es estrictamente “prioridad en el tiempo”. En *Categorías*, 12, Aristóteles sostiene que una cosa es anterior a otra (o primera respecto de otra; *prôteron héteron hetérou*) de cuatro maneras: en primer lugar y en el sentido más estricto, según el tiempo, como cuando se dice que una cosa es más vieja y más antigua que otra (14a26-28).

¹⁴ *Analíticos posteriores*, 93a1-8.

¹⁵ O sea, el término “vivir” es un homónimo, pues puede decirse de *i*) una planta —cuyas únicas operaciones vitales son alimentarse, crecer, decrecer, reposo en un lugar y reproducirse—, pero también *ii*) de un animal que, además de esas operaciones, tiene sensaciones (con lo que ello implica, *i. e.*, imaginación, deseo y, por ende, placer y dolor, además de una forma rudimentaria de “conocimiento sensible”, etc.), y finalmente, en la cumbre de la *scala naturae*, *iii*) de un ser humano que, además de las operaciones que poseen los entes descritos en *i*) y *ii*), posee actividades anímicas intelectuales con todo lo que eso también conlleva (*i. e.*, y el conocimiento no sensible, aprehensión intelectual, elección, decisión, etc.). Cf. *Acerca del alma*, 412a14-15.

¹⁶ Esto es, la “vida nutritiva o vegetativa” es condición necesaria de todas las condiciones de vida.

¹⁷ Es decir, solamente tienen la facultad nutritiva o vegetativa (*tò threptikón*).

males”, y no decimos solamente que “viven”.¹⁸ El tacto se da en todos [los animales] como el aspecto primario de la sensación.¹⁹ Y tal como la facultad nutritiva puede darse independientemente del tacto y de toda sensación, así también el tacto puede darse independientemente de los demás sentidos. Llamamos “facultad nutritiva” a la parte del alma que es de un tipo tal que también las plantas participan. Todos los animales, en cambio, evidentemente tienen el sentido del tacto. Más tarde diremos por qué razón sucede cada una de estas cosas.²⁰ Por ahora basta solamente con decir que el alma es un principio de estas [facultades] ya mencionadas y que se determina por ellas: por la facultad nutritiva, sensitiva, del pensar y por el movimiento. Si cada una de ellas es alma o una parte del alma y, si es una parte, si es tal que es separable únicamente conceptual o también locativamente, no es difícil advertirlo respecto de algunos de esos casos, pero otros implican una dificultad. En efecto, tal como resulta evidente que algunas plantas siguen viviendo aun estando divididas y separadas entre sí, ya que el alma en ellas —[o sea] en cada planta— es una sola en acto pero múltiple en potencia, así [también] vemos que, en relación con otras distinciones del alma, sucede en los insectos que están divididos. Pues cada una de dichas partes tiene sensación y movimiento locativo; y si [tiene] sensación, también tiene imaginación y deseo, ya que donde hay sensación, también hay dolor y placer, y donde están presentes estas [afecciones], forzosamente también hay apetito.²¹ Sin embargo, en lo que concierne al intelecto, es decir, a la facultad teórica [la cuestión] todavía no es evidente, sino que parece tratarse de un género diferente de alma y ese [género de alma] solamente puede ser separado, tal como lo eterno respecto de lo corruptible.²² Pero en lo que se refiere

¹⁸ Para la sensación (*aísthesis*) como principio distintivo del animal, cf. también *De sensu*, 436b10-12.

¹⁹ Para el tacto como sentido del cual no puede carecer ningún animal véase también *De sensu*, 436b10-14.

²⁰ Cf. *Acerca del alma*, 11, 10-12.

²¹ Este pasaje es, en cierto modo, decisivo para advertir la relevancia de la sensación (*aísthesis*) como facultad cognitiva básica que, por así decir, desencadena o “dispara” facultades o ítems intencionales como la imaginación (*phantasia*), el deseo (*órexis*), el placer y el dolor. Por lo general traduzco *órexis* por “deseo” y *epithymía* por “apetito”. El hecho de que Aristóteles defina técnicamente *epithymía* como “deseo de lo placentero” (*Tópicos*, 140b27; *Sobre las partes de los animales*, 661a8; *Retórica*, 137a17; *Acerca del alma*, 414b5-6) hace pensar en un deseo irracional, de donde “apetito”.

²² Se refiere, claro está, al alma racional. Sobre las dudas que manifiesta Aristóteles a lo largo de todo el tratado respecto de la posibilidad de que pueda existir este tipo de alma separada del cuerpo me permito remitir a la Introducción, sección 1.1, donde presento un argumento conceptual y textual para mostrar que hay más razones para creer que Aristóteles no suscribe la inmortalidad del alma después de la muerte, que sería un caso de “separabilidad” o, más precisamente, un caso de una forma que no se da en un compuesto, violando un principio básico del hilemorfismo. L. Gerson (“The Unity of Intellect in Aristotle’s *De Anima*”, pp. 352-353) especula que el intelecto no es una función psíquica. Pero si ese fuera el caso, no veo cómo habría que entender *dianoetikón* —una de las expresiones que usa Aristóteles para referirse al alma intelectiva— en *Acerca del alma*, 414a31-32, donde es una entre varias *dynámeis* (capaci-

a las demás partes del alma, es manifiesto a partir de esto que no son separables,²³ como algunos sostienen. Sin embargo, que son diferentes en cuanto a su definición es evidente, pues la facultad sensitiva es diferente de la que opina,²⁴ si en realidad sentir también [es distinto] de opinar, y del mismo modo también en lo que respecta a cada una de las demás [facultades] mencionadas. Además, algunos animales tienen todas estas [facultades]; otros, algunas de ellas, y otros únicamente una de ellas,²⁵ y esto producirá una distinción entre los animales. Por qué razón es así, debemos examinarlo más tarde. De un modo similar también sucede en relación con los sentidos, pues unos los tienen todos; otros, algunos, y otros, uno solo, el más necesario: el tacto.

Pero puesto que [la expresión] “aquello gracias a lo cual vivimos y sentimos” se dice de dos maneras, tal como [la expresión] “aquello gracias a lo cual conocemos” —nos referimos en un caso al conocimiento y en otro al alma, pues afirmamos que conocemos gracias a cada una de esas dos cosas—, de igual modo también estamos sanos en un caso debido a la salud; en otro, debido a una cierta parte del cuerpo o incluso a su totalidad. Pero, de esas cosas, tanto el conocimiento como la salud son configuración y una cierta forma, es decir, una definición; es como si fuera una actividad [del cuerpo] que recibe. En un caso, de lo que es capaz [de recibir] el objeto de conocimiento; en el otro, de lo que es capaz [de recibir] el objeto de la salud. En efecto, parece que la actividad de los [factores] activos se da en lo que es afectado y en lo que se encuentra dispuesto. Pero el alma es prioritariamente aquello gracias a lo cual vivimos, sentimos y pensamos, de modo que será un cierto principio explicativo, es decir, una forma, no materia, esto es, sustrato. Pues “sustancia” se dice de tres maneras, según dijimos: forma, materia, y lo que se compone de ambas. Y de ellos, la materia es potencia y la forma actualidad, dado que lo que se compone de ambas cosas es animado, el cuerpo no es la actualidad del alma, sino que ésta [es la actualidad] de un cierto cuerpo. Es también por esa razón que hacen una suposición apropiada aquellos a los que les parece que el alma no existe sin un cuerpo ni es un cierto cuerpo.²⁶ En efecto, no

dades, facultades o “funciones”) del alma junto con lo nutritivo, lo sensitivo, lo desiderativo y lo que mueve al animal según el lugar. Véase también 413b11-14 y 429a27-28. Para la expresión “alma intelectual o racional” (*dianoetikè psyché*), cf. 431a14.

²³ En efecto, ni el alma nutritiva ni la sensitiva pueden seguir siendo lo que son independientemente del cuerpo.

²⁴ “La facultad de la opinión” (*tò doxastikón*), otra manera de hablar del alma racional o intelectual (413b13; 414a32; b18; 429a28; 431a14).

²⁵ El tacto.

²⁶ Creo que la relevancia de esta sutil observación de Aristóteles difícilmente puede ser exagerada; en efecto, es descriptiva, del modo en que la psicología aristotélica se distancia de la psicología platónica (“el

es un cuerpo, sino algo del cuerpo,²⁷ y por eso se da en un cuerpo, y en un cuerpo de una cierta índole. No es como [pensaron] los que nos precedieron, que la adjuntaban a un cuerpo, sin determinar para nada en qué o en cuál [cuerpo], aun cuando no sea manifiesto que una cosa al azar sea capaz de recibir una cosa al azar. Es así como sucede también según la definición, pues la actualidad de cada cosa sobrevive por naturaleza a lo que existe en potencia y a la materia apropiada. Por consiguiente, que [el alma] es una cierta actualidad, es decir, un principio explicativo de lo que tiene potencia de ser tal, es evidente a partir de estos [argumentos].

III

De las facultades del alma mencionadas, algunos tienen todas, según dijimos; otros, algunas de ellas, y otros, una sola. Mencionamos las facultades nutritiva, sensitiva, desiderativa, motriz según el lugar, intelectiva. Las plantas solamente tienen la nutritiva, otros [seres vivos] tienen esta y también tienen la desiderativa, pues el deseo es apetito, cólera, y deseo racional.²⁸ Todos los animales tienen al menos un sentido, el tacto, y el que tiene sensación tiene placer y dolor, lo placentero y lo doloroso, y cuando estas cosas se hacen presentes también hay apetito, pues éste es un deseo por lo placentero. Más aun, [los animales] tienen la sensa-

alma no existe sin un cuerpo”) pero, al mismo tiempo, conserva un supuesto fundamental del platonismo (“el alma no es un cierto cuerpo”). La innovación de Aristóteles consiste en enfatizar que las operaciones anímicas no pueden ocurrir independientemente de un cuerpo. Para una discusión detallada de estas líneas me permito enviar a M. D. Boeri, “μήτ’ ἄνευ σώματος εἶναι μήτε σώμα τι ἡ ψυχὴ (Aristóteles, *De anima*, B 2.414a19-20): a propósito del alcance de las interpretaciones funcionalistas de la psicología aristotélica y del carácter causal del alma”. [Ed.: μήτ’ ἄνευ σώματος εἶναι μήτε σώμα τι ἡ ψυχὴ: “El alma no existe sin un cuerpo ni es un cierto cuerpo”].

²⁷ Este tipo de pasaje justifica el enfoque atribuísta. Véase la introducción, sección 1.2.

²⁸ Pasajes como éste muestran que *boulesis* no puede interpretarse como “voluntad” (tal como desafortunadamente todavía insisten en hacer algunos intérpretes y traductores de Aristóteles, sobre todo de lengua española). Este texto prueba, con toda claridad en mi opinión, que la *boulesis* (una forma estrictamente racional *del deseo* que, por tanto, solamente puede estar presente en el ser humano) no puede entenderse como voluntad en el sentido de una facultad (como tiende a hacernos pensar en nuestra lengua —y en general en las lenguas modernas— la palabra “voluntad”). Si en realidad *boulesis* pudiese significar “voluntad”, habría que explicar por qué Aristóteles hace depender la *boulesis* de la “facultad de desear” (*tò orektikón*), la cual, a su vez, debe depender de la facultad sensitiva (*tò aisthetikón*). Que la *boulesis* es una forma estrictamente racional del deseo, se ve también en *Acerca del alma*, 432b5-6 y 433a26-27, donde queda claro que cuando el deseo está asociado a la parte racional del alma es la *boulesis*, en tanto que cuando lo está a la parte irracional es apetito (*epithymía*) o cólera (*thymós*). Cf. también *Ética eudemia*, 1223a26-27; un examen más o menos sistemático del deseo o querer racional (*boulesis*) que puede verse en *Ética a Nicómaco*, III, 4-5.

ción del alimento, pues el tacto es sensación del alimento.²⁹ En efecto, todos los seres vivos se alimentan de cosas secas, húmedas, calientes y frías, y el tacto es una sensación de estas cosas. Las demás [cualidades] sensibles, en cambio, [son captadas por el tacto] accidentalmente, pues un sonido, un color o un olor no contribuyen en nada al alimento. El sabor, por su parte, es una de las [cualidades] táctiles. Hambre y sed son apetitos: el hambre de lo que es seco y caliente, la sed de lo que es húmedo y frío. El sabor, en cambio, es como un condimento de estas cosas. Más tarde tendremos que aclarar estos asuntos; baste por el momento con decir que los animales que tienen tacto también tienen deseo. En cuanto a la imaginación, es un tema oscuro,³⁰ y tenemos que examinarlo más tarde. Algunos [animales], además de estas cosas, también tienen la facultad del movimiento locativo; otros, como el ser humano y si hay algo de una índole diferente o más valioso,³¹ no sólo de la facultad intelectual, sino también del intelecto.

Es evidente, por lo tanto, que del mismo modo habrá una sola definición tanto de alma como de figura, pues en este caso no hay una figura aparte del triángulo y las [figuras] sucesivas, ni tampoco en aquel caso hay un alma aparte de las ya mencionadas.³² En las figuras podría haber una definición común, que se aplicara a todas y no será propia de ninguna figura. De modo similar sucederá también en el caso de los [tipos de] alma ya mencionados. Es ridículo, por lo tanto, buscar en estas y otras cosas una definición común, que no vaya a ser una definición propia de ningún ente y que no se aplique según la especie propia e indivisible, renun-

²⁹ Como se verá en seguida, el “tacto lingual” (o “que se da en la lengua”; 423a17) es una forma especial de tacto, pues el gusto se encuentra entre lo que es táctil (cf. 414b11).

³⁰ Para el tratamiento pormenorizado de la imaginación en *Acerca del alma*, cf. III, 3 y mi discusión en la introducción, sección 3.2.

³¹ Probablemente está pensando en dios, que en su tratamiento de *Metafísica*, XII, es el modelo de toda intelección y se identifica con dicha intelección, i. e., con la actividad misma del pensar (probablemente no es casual que Aristóteles opte por decir *nóesis* cuando habla de la actividad pura del pensar y no *noús*, que puede involucrar algún tipo de ingrediente pasivo impropio de dios; cf. *Acerca del alma*, 429a22: *dynatós*). El ser divino entendido como “intelección de la intelección” (*Metafísica*, 1074b34-35) no es capaz de pensar; simplemente piensa todo el tiempo. Su ser es la pura actividad y dicha actividad permanente es su pensar. A mi juicio, es bastante claro que en *Acerca del alma*, III, 5, Aristóteles está hablando fundamentalmente del intelecto humano, que puede estar activo *cuando piensa* (“intelecto agente”) o en potencia como “capacidad de pensar” (“intelecto paciente”), porque *puede* pensar pero no lo está haciendo. Esta distinción solamente puede hacerse en el humano, el único caso en el que hay un intelecto anclado a un cuerpo. En dios el intelecto nunca se da como *capacidad* (que supondría un aspecto pasivo que Aristóteles expresamente niega en el caso del ser divino; cf. *Metafísica*, XII, 6-7), sino que es pura actividad.

³² O sea, tal como hay una sola definición de “figura” (que debe valer para todos los tipos de figura), así también hay una sola definición de alma (que debe valer para todos los tipos de alma). Y hay una sola definición de cada ente unitario porque las esencias son únicas, de donde se sigue que sus definiciones —que son la expresión proposicional de tales esencias— también deben ser únicas. Cf. *Metafísica*, 1006a31-b4 y nuestra introducción, pp. C-CI.

ciando a tal definición. Los casos de las figuras y de los asuntos concernientes al alma son paralelos, pues siempre, tanto en las figuras como en los seres animados, en el [término] sucesivo está en potencia el [término] antecedente.³³ Por ejemplo, en el cuadrado [está contenido] el triángulo, y en lo sensitivo, lo nutritivo. Por consiguiente, hay que investigar caso por caso cuál es el alma de cada cosa —por ejemplo, cuál es la de una planta, cuál la de un hombre o de una bestia—. Por qué razón se encuentran dispuestos de este modo sucesivamente, debemos examinarlo, pues sin lo nutritivo lo sensitivo no existe. En las plantas, en cambio, lo nutritivo está separado de lo sensitivo y, a su vez, sin lo tangible no existe ninguno de los demás sentidos, pero el tacto existe sin los demás [sentidos]. Pues muchos animales no tienen vista ni oído ni sentido del olfato. Entre [los animales] que poseen la facultad sensitiva, unos tienen la facultad del movimiento locativo y otros no la tienen. Finalmente, una minoría posee cálculo racional y pensamiento, pues entre los seres destructibles aquellos que tienen cálculo racional también tienen todas las demás [facultades], en tanto que no todos los que poseen cada una de aquellas [facultades] tienen cálculo racional. Algunos ni siquiera tienen imaginación, en tanto que otros viven solamente con imaginación. En cuanto al [intelecto] teórico [es objeto de] otra discusión.³⁴ Por consiguiente, es manifiesto que ésta es la definición más apropiada acerca de cada una de estas cosas y acerca del alma.

IV

El que va a investigar acerca de estas cosas debe aprehender qué es cada una de ellas; luego, investigar de este modo acerca de lo que le sigue y acerca de las demás cosas. Pero si hay que decir qué es cada una de ellas —por ejemplo, qué es la [facultad] intelectual, sensitiva o nutritiva—, además hay que decir qué es entender y qué sentir. En efecto, las actividades y acciones son conceptualmente anteriores a las facultades.³⁵ Y si es así, habría que haber considerado como anteriores a ellas a sus objetos correlativos, *i. e.*, habría que determinar primero sobre ellos por la misma razón, como acerca del alimento, de lo sensible y de lo inteligible. Por tanto, hay que discutir en primer lugar acerca del alimento y de la reproducción, pues el alma nutritiva también se da en los demás [vivientes] y es la facultad

³³ Para la comprensión de estas líneas me permito remitir a mi argumento *ex gradibus vitae* en la introducción, sección 1.1.

³⁴ Cf. *infra*, *Acerca del alma*, III, 4-6.

³⁵ Creo que la distinción que subyace a esta observación es la distinción “primero por sí”, “primero para nosotros”, para cuya explicación véase *supra* mi nota a *Acerca del alma*, 413a11-13.

prioritaria y más común del alma, en virtud de la cual se da la vida para todos [los vivientes]. Sus funciones son la reproducción y el uso del alimento, pues para los vivientes que son completos y no están mutilados ni tienen generación espontánea la más natural de sus funciones es producir otro como ellos mismos —un animal un animal, una planta una planta— para que, en la medida de lo posible, participen de lo eterno y de lo divino. Todos, en efecto, tienden a ello y hacen lo que hacen por naturaleza en vista de ello. Pero “aquello en vista de lo cual” es doble: “aquello en vista de lo cual” y “aquello en vista de quién”.³⁶ Ahora bien, dado que es imposible participar de lo eterno y de lo divino de manera continua, por cuanto nada destructible puede persistir [siendo] lo mismo y numéricamente uno, en la medida en que cada uno puede participar, así participa, uno más, otro menos, y persiste [siendo] no el mismo [individuo], sino [en algo que es] como él mismo, [es decir que] no es uno en número, sino que es uno en especie.³⁷

El alma es causa y principio del cuerpo viviente. Éstos,³⁸ sin embargo, se dicen de muchas maneras,³⁹ y de modo similar, el alma es causa de acuerdo con tres modos determinados [de ser causa], pues el alma es causa *i*) como aquello desde donde se produce éste movimiento, *ii*) como aquello en vista de lo cual y *iii*) como la sustancia de las cosas animadas.⁴⁰ Ahora bien, que [el alma es causa] como sustancia es evidente, pues la sustancia es causa del ser para todas las cosas, y vivir es el ser para los vivientes, y causa y principio de eso es el alma. Además, la actualidad de lo que es en potencia es su explicación formal. Pero es manifiesto que el alma también es causa en el sentido de aquello en vista de lo cual, pues tal como el intelecto produce en vista de algo, del mismo modo también [lo hace] la naturaleza, pues eso constituye su fin. Y, de acuerdo con la naturaleza, el alma es algo de tal índole en los vivientes, pues todos los cuerpos naturales son instru-

³⁶ Se trata de una distinción muy frecuente en Aristóteles (cf. *Física*, 194a35-36; *Metafísica*, 1072b2-3; *Ética eudemia*, 1249b15). El primer sentido de “aquello en vista de lo cual” es el propósito para el cual algo es hecho. El fin en el sentido de “aquello en vista de quién” se refiere al agente o al beneficiario para el cual algo es hecho o producido. Por ejemplo, en el dominio de la actividad técnica o artesanal, para el constructor el fin como “aquello en vista de lo cual” es producir un refugio apropiado para la lluvia o las inclemencias del tiempo, pero el constructor hace o produce tal refugio *para nosotros*. En este sentido nosotros somos el fin del constructor en el sentido de “aquello en vista de quién”.

³⁷ O sea que no es posible la persistencia numérica de cada individuo (no hay posibilidad, por tanto, de la persistencia de la identidad individual tras la muerte y, por ende, de la inmortalidad del alma, sino que sólo es posible la identidad específica: la identidad de la propia especie de cada cosa se transfiere a su descendencia). Sobre la diferencia entre identidad numérica y específica, cf. Aristóteles, *Metafísica*, 1018a5-9. Aristóteles construye su argumento de la imposibilidad de persistencia numérica con un ojo puesto en Platón, *Simposio* 208a-b (debo esta referencia a José Pablo Martín).

³⁸ “Causa” y “principio”.

³⁹ Cf. *Metafísica*, V, 1-2; *Física*, II, 3.

⁴⁰ O sea, causa motriz, final y formal.

mentos del alma, y como los de los animales, así también son los de las plantas, por cuanto son en vista del alma. “Aquello en vista de lo cual” [se dice] de dos maneras: “aquello en vista de lo cual” y “aquello en vista de quién”. Desde luego que también aquello primero desde donde se produce el movimiento locativo es alma. Esta facultad, sin embargo, no se da en todos los vivientes. Tanto alteración como crecimiento se dan gracias al alma, pues la sensación parece ser un cierto tipo de alteración y nada que no participe de alma percibe sensorialmente; de modo similar ocurre respecto del crecimiento y el decrecimiento, pues nada decrece ni crece en sentido físico si no se alimenta, y nada que no participe de vida se alimenta. Empédocles no ha argumentado bien cuando agrega que las plantas crecen cuando estas tienden sus raíces hacia abajo porque la tierra se mueve en esta dirección según su naturaleza, y [las ramas] hacia arriba porque es de este mismo modo [como se mueve] el fuego. No entiende correctamente, en efecto, el arriba y el abajo, pues el arriba y el abajo no es lo mismo para todas las cosas y para el universo, sino que tal como es la cabeza de los animales, así también son las raíces de las plantas, si hay que decir que los órganos son distintos e idénticos por sus funciones. Además, ¿qué es lo que mantiene unido al fuego y a la tierra que se mueven en direcciones contrarias? Pues si no hubiera algo que lo impidiera, se dispersarían. Y si va a haberlo, eso es el alma, es decir, la causa de que crezcan y se alimenten. Pero algunos creen que la naturaleza del fuego es causa en sentido estricto de la alimentación y del crecimiento, pues él es el único entre los cuerpos [o elementos] que, evidentemente, se alimenta y crece, razón por la cual uno podría suponer que es él el que actúa, tanto en plantas como en animales. Sin embargo, [el fuego] es, en cierto modo, con causa, no causa en sentido estricto, sino que, más bien, [es causa en sentido estricto] el alma. Pues el crecimiento del fuego va al infinito, hasta que haya [algo] combustible, en tanto que de todas las cosas que se constituyen por naturaleza hay un límite, es decir, una proporción, tanto de su magnitud como de su crecimiento. Estas características⁴¹ son propias del alma, no del fuego, de la forma más que de la materia.

Puesto que la facultad nutritiva y reproductiva del alma es la misma, hay que determinar primero lo concerniente al alimento, pues [la facultad nutritiva] se distingue de las demás facultades por esta función.⁴² Parece que lo contrario es alimento para lo contrario, aunque no todo [contrario] lo es de todo [contrario], sino cuantos contrarios se generan no sólo los unos a los otros, sino que crecen [de manera conjunta]. Muchos, en efecto, se generan unos de otros pero no todos son

⁴¹ Es decir, el tener un límite y una proporción.

⁴² O sea, la de absorber alimento.

cantidades; por ejemplo, sano de enfermo. Es evidente que aquellas cosas no son alimento recíproco del mismo modo, sino que el agua es alimento para el fuego, pero el fuego no alimenta el agua. Pues bien, parece que eso⁴³ se da especialmente en el caso de los cuerpos simples, que uno sea alimento y el otro alimentado. Esto, sin embargo, contiene una dificultad: en efecto, unos sostienen que lo semejante se alimenta con lo semejante, y que también [lo uno] es hecho crecer [por lo otro]. Otros, en cambio, como dijimos, son del parecer opuesto: el contrario [se alimenta y crece] con el contrario, por cuanto lo semejante no puede ser afectado por lo semejante, pero el alimento tiene que cambiar y ser digerido. Pero el cambio es, para todas las cosas, hacia lo opuesto o lo intermedio. Además, el alimento experimenta una afección por obra de lo que recibe el alimento, pero esto no [experimenta tal afección] por obra del alimento, como tampoco el carpintero [experimenta una afección] por obra de la materia, sino que ésta la experimenta por obra de aquel. El carpintero sólo cambia desde el reposo hacia la actividad. Hay una diferencia, no obstante, si el alimento es lo último o lo primero que se agrega [al cuerpo]. Pero si ambas cosas [son alimento], la [materia] no digerida y la digerida, se podría hablar de “alimento” en ambos sentidos. En efecto, en tanto no digerida, lo contrario es alimentado por lo contrario, y en tanto digerida, lo semejante por lo semejante. Es evidente, por tanto, que, en cierto modo, ambos se expresan correcta e incorrectamente; pero puesto que nada que no participe de vida se alimenta, lo animado será un cuerpo alimentado, en tanto animado, de manera que también el alimento se relaciona con lo animado, y no en un sentido accidental. Sin embargo, es diferente “ser alimento” y “ser facultad de crecimiento”, pues en cuanto lo animado constituye una cierta cantidad es facultad de crecimiento, pero en cuanto es un “esto”, es decir, una sustancia, es alimento, pues [éste] conserva la sustancia [del viviente], el cual existe en la medida en que se alimenta. Y es productor de generación, no del [individuo] que se alimenta, sino [de un individuo que es] como el que se alimenta. Pues la sustancia de este [último] ya existe, y nada se genera así mismo, sino que se conserva. De manera que el principio del alma es una facultad tal que conserva a lo que la tiene en cuanto tal, en tanto que el alimento le permite actuar. Es por eso que, si está privado del alimento, no puede existir. Pero puesto que hay tres factores —lo alimentado, aquello con lo que se alimenta y lo que alimenta—, lo que alimenta es el alma primera;⁴⁴ lo alimentado, el cuerpo que la tiene, y aquello con lo que se alimenta, el alimento. Pero dado que es justo denominar a todas las cosas desde su fin, y su fin es generar

⁴³ El que un contrario sea alimento de otro.

⁴⁴ Esto es, la facultad o alma nutritiva.

[un individuo] como él mismo, el alma primera será generadora [de un individuo] como él mismo. “Aquello con lo cual se alimenta” se entiende de dos modos: como “aquello con lo que gobierna” —la mano y el timón, lo que mueve y lo que es movido, y solamente lo que es movido—. Pero es necesario que todo alimento pueda ser digerido, y lo caliente produce la digestión; por lo tanto, todo lo animado contiene calor.

Pues bien, se ha dicho de una manera esquemática qué es el alimento; hay que hacer más tarde las aclaraciones sobre él en los tratados apropiados.⁴⁵

BIBLIOGRAFÍA

- Aristóteles, *De Anima*, trad., introd. y notas de R. D. Hicks, Cambridge University Press, Cambridge, 1907.
- (J. A. Smith, ed.), *On the Soul*, en J. Barnes (comp.), *The Complete Works of Aristotle. The Revised Oxford Translation*, vol. 1, Princeton University Press, Nueva Jersey, 1995.
- Boeri, M. D., “μήτ’ ἄνευ σώματος εἶναι μήτε σῶμά τι ἢ ψυχή (Aristóteles, *De anima*, B 2. 414 a 19-20): a propósito del alcance de las interpretaciones funcionalistas de la psicología aristotélica y del carácter causal del alma”, *Elenchos*, 30 (1): 53-97, 2009.
- Bos, A. P., “Aristotle’s Psychology: The Traditional (Hylomorphistic) Interpretation Refuted”, Twentieth World Congress of Philosophy, Boston, Massachusetts, del 10 al 15 de agosto de 1998. Disponible en <<https://www.bu.edu/wcp/Papers/Anci/AnciBos.htm>>.
- “‘Aristotelian’ and ‘Platonic’ Dualism in Hellenistic and Early Christian Philosophy and in Gnosticism”, *Vigiliae Christianae*, 56: 273-291, 2002.
- , “Why the Soul Needs and Instrumental Body According to Aristotle (*De Anima*, I, 3, 470b13-26)?”, *Hermes*, 128 (1): 20-31.
- Charlton, W., “Aristotle’s Definition of Soul”, en T. Irwin (comp.), *Aristotle. Metaphysics, Epistemology, Natural Philosophy*, Garland Publishing, Nueva York y Londres, 1995, pp. 244-260.
- Gerson, L., “The Unity of Intellect in Aristotle’s *De Anima*”, *Phronesis*, 49 (4): 348-373, 2004.

⁴⁵ Probablemente en el tratado perdido *Sobre el alimento*.

René Descartes

II. EL TRATADO DEL HOMBRE* (Fragmentos)

ESTOS HOMBRES estarán compuestos por un alma y un cuerpo.¹ Primero, será necesario que yo describa su cuerpo aparte, y, luego, su alma también aparte; finalmente, deberé mostrar cómo estas dos naturalezas tienen que ajustarse y unirse a fin de formar hombres semejantes a nosotros.

Supongo que el cuerpo no sea otra cosa que una estatua o máquina hecha de tierra² que Dios forma con el propósito de hacerla lo más semejante a nosotros que sea posible: no sólo le confiere externamente el color y la forma de todos nuestros miembros, sino que también pone en su interior todas las partes necesarias para que se mueva, coma, respire y, últimamente, imite todas las funciones que son las nuestras y que podemos imaginar que proceden de la materia y únicamente dependen de la disposición de los órganos.

Vemos relojes, fuentes artificiales, molinos y otras máquinas que a pesar de estar hechas por el hombre no dejan de tener el poder de moverse de diversos modos por sí mismas; y me parece que yo no podría imaginar tantos movimientos en esta máquina que supongo ha sido hecha por las manos de Dios, ni podría atribuirle tanta perfección como para que alguien no pueda pensar que pudiera ser aún más perfecta.

Ahora bien, no me detendré para describir los huesos, los nervios, los músculos, las arterias, el estómago, el hígado, el bazo, el corazón, el cerebro, ni todas las otras piezas que la componen, puesto que supongo que son totalmente iguales a

* Esta traducción se basa en la versión facsimilar de *L'Homme*, Charles Angot Libraire, París, 1664. Disponible en <<http://fr.wikisource.org>>. Las notas en el texto son del autor de la traducción al inglés. El texto de la edición en inglés apareció originalmente en *The Philosophical Writings of Descartes*, vol. I, trad. de J. Cottingham, R. Stoothoff y D. Murdoch, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.

¹ Por “estos hombres” Descartes se refiere a los hombres ficticios que presentó en una sección previa (perdida) de la obra. Su descripción se realiza para arrojar luz sobre la naturaleza de los hombres reales, en la misma forma que la descripción de un “nuevo mundo” en el capítulo 6 de *El mundo* se hace para dar luz al mundo real; véase también el *Discurso*, parte 5.

² Por “tierra” Descartes da a entender el tercer “elemento” que ya había discutido en *El mundo*, capítulo 5.

las partes de nuestro cuerpo que tienen el mismo nombre y que os las puede mostrar un sabio anatomista, a lo menos las que son suficientemente grandes para observarse a simple vista, si no las conocéis vosotros mismos. Respecto a aquellas que por su pequeña dimensión son invisibles, os las podré dar a conocer más fácil y claramente si os describo los movimientos que de ellas dependen. Sólo será necesario que explique por orden estos movimientos indicando al mismo tiempo cuáles de nuestras funciones representan [...] ³

Las partes de la sangre que llegan hasta el cerebro no sólo sirven para nutrir y sustentar a su sustancia, sino también y sobre todo para generar en él un cierto viento muy sutil, ⁴ o más bien, una llama muy viva y muy pura, que denominamos *espíritus animales*. Pues debe notarse que las arterias que las acarrearán desde el corazón, tras dividirse en innumerables pequeñas ramificaciones y de haber formado los pequeños tejidos que se extienden como tapices en el fondo de las concavidades del cerebro, se reúnen en torno a una cierta pequeña *glándula* ⁵ situada aproximadamente en el centro de la sustancia del cerebro a la entrada misma de las concavidades; estas arterias tienen un sinnúmero de pequeños orificios por donde fluyen las partes más finas de la sangre hasta esta glándula [...] Así, estas partes de la sangre, sin más preparación ni modificación, exceptuando que se han separado de las más gruesas y que conservan la extrema velocidad que les ha dado el calor del corazón, dejan de tener la forma de la sangre y se denominan espíritus animales.

Ahora bien, al ir penetrando estos espíritus en las concavidades del cerebro, se introducen progresivamente en los poros de su sustancia, y desde éstos en los nervios. Al penetrar o tender a penetrar en mayor o menor cantidad, según los casos, tienen la fuerza para variar la forma de los músculos en que se insertan y de este modo pueden mover todos los miembros. Similarmente, vosotros habéis podido observar en las grutas y fuentes de los jardines reales que basta la fuerza con la cual el agua brota para mover diversas máquinas e incluso para tocar algunos instrumentos o pronunciar algunas palabras, de conformidad con el ordenamiento de los tubos que conducen el agua.

³ Sigue una descripción de la digestión, la generación y la circulación de la sangre, y la acción del corazón y de la respiración. Cf. *Discurso del método*, parte 5, *Tratado de las pasiones*, parte 1, arts. 3-10, y *Descripción del cuerpo humano*.

⁴ En francés, *un certain vent très subtil*, frase que para Descartes tiene el sentido de “un cierto viento compuesto de partículas muy pequeñas y muy veloces”.

⁵ La glándula pineal que posteriormente Descartes identifica como el asiento de la imaginación y del “sentido común”. Véase también el *Tratado de las pasiones*, donde se identifica la glándula como el asiento del alma.

Ciertamente se pueden comparar los nervios de esta máquina que os estoy describiendo con los tubos de estas fuentes; sus músculos y tendones con los otros diversos dispositivos y resortes que sirven para ponerlas en movimiento; los espíritus animales con el agua que las accionan; su corazón con el manantial, y las concavidades del cerebro con los depósitos del agua. Además, la respiración y otras actividades similares que son naturales y comunes en ella y que dependen del curso de los espíritus, son como los movimientos de un reloj o de un molino que gracias al flujo normal del agua pueden ser continuos. Los objetos exteriores, cuya sola presencia activa los órganos de sus sentidos, y que así la determinan a moverse de diversas maneras, según estén dispuestas las partes del cerebro, son como los visitantes que al entrar en alguna de las grutas de estas fuentes inadvertidamente causan los movimientos que ante ellos suceden: pues no pueden entrar sin pisar ciertas losetas de tal manera dispuestas que, por ejemplo, si se acercan a una Diana que se está bañando, harán que se oculte tras unos juncos, y si intentan perseguirla, provocarán la aparición de un Neptuno que los amenaza con su tridente; si siguen por algún otro lado, harán que salga un monstruo marino que les vomitará agua en el rostro, u otras cosas parecidas según haya sido el capricho de los ingenieros que construyeron las fuentes. Finalmente, cuando haya en esta máquina un *alma racional*, ésta tendrá su asiento principal en el cerebro y habrá de ser como el fontanero que debe estar en los depósitos a donde regresan los tubos de estas máquinas, cuando desea activar, impedir, o modificar en alguna forma sus movimientos [...] ⁶

Para entender con base en lo anterior cómo los objetos externos que impactan los órganos de los sentidos pueden activar esta máquina, de manera que mueva de mil otras formas todos sus miembros, hay que considerar que los pequeños filamentos que, como ya os he dicho, provienen de la parte más interna del cerebro y forman la médula de los nervios, se encuentran dispuestos de tal manera que todas las partes que funcionan como órgano de algún sentido, puedan activarse fácilmente por los objetos que afectan los sentidos; en el caso de que no se activaran más que ligeramente, en ese momento tiran de las partes del cerebro donde se originan y de esta manera provocan la apertura de las entradas de ciertos poros en la superficie interna del cerebro. A través de éstos, los espíritus animales en las concavidades del cerebro se dirigen hacia los nervios y los músculos, los cuales sirven para generar movimientos en la máquina que son muy similares

⁶ Sigue una descripción de la forma en que los espíritus animales generan los movimientos musculares, la respiración, la deglución, etc. Véase el *Tratado de las pasiones*, parte 1.



FIGURA II.1

a los que nosotros solemos realizar cuando nuestros sentidos son estimulados en la misma forma.

Así, por ejemplo (véase figura II.1), si el fuego *A* está cerca del pie *B*, las pequeñas partículas de este fuego, que como sabéis se mueven muy rápidamente, poseen la fuerza para mover también el área de la piel que impactan; estiran así el pequeño filamento *c*, que está unido al pie y al mismo tiempo abren la entrada del poro *d-e*, en el que termina el pequeño filamento, de la misma manera que al tirar del extremo de una cuerda se hace sonar al mismo tiempo una campana cuyo badajo se une al otro extremo.

Ahora bien, cuando se abre la entrada al poro o al pequeño conducto *d-e*, los espíritus animales de la concavidad *F* entran en su interior y algunos son conducidos hasta los músculos que sirven para retirar el pie del fuego; algunos hasta los músculos que sirven para mover la cabeza y mirarlo, y algunos hasta los músculos que sirven para adelantar las manos y para torcer y proteger el cuerpo [...]

Ahora, quiero deciros que cuando Dios una a esta máquina un alma racional, como pretendo explicar más adelante, le dará el cerebro como sede principal y hará que su naturaleza sea tal, que pueda tener sensaciones diferentes que se co-

rrespondan con las distintas formas en que se abran por medio de los nervios las entradas de los poros.

Supongamos, en primer lugar, que si se tira de los filamentos que componen la médula de los nervios con tal fuerza que se rompan y se separen de la parte del cuerpo a que están unidos, de forma que toda la estructura de la máquina en cierto sentido se deteriorara, el movimiento que se pudiera causar en el cerebro daría lugar a que el alma, que quiere conservar su morada, tenga la sensación del *dolor*.

Y si se tira de los filamentos con una fuerza casi igual a la precedente, pero sin que éstos se rompan o se separen de las partes a las que estén unidos, habrán de causar un movimiento en el cerebro, que dando testimonio de la buena condición de las otras partes del cuerpo dará lugar a que el cerebro experimente cierta voluptuosidad corporal que llamamos *cosquilleo*, sensación, aunque muy cercana al dolor en relación con la causa, totalmente opuesta en relación con el efecto.

Si se tira de varios de los filamentos al mismo tiempo, el alma sentirá que la superficie del cuerpo que toca el miembro donde terminan es *lisa*, y si se tira de los filamentos de manera irregular, el alma sentirá que la superficie es irregular y *tosca*.

Si se tira ligeramente de los filamentos, separados unos de los otros, como continuamente sucede gracias al calor que el corazón comunica a los demás miembros, el alma no experimentará ninguna sensación, al igual que sucede con todas las acciones normales. Pero si el mismo movimiento se intensifica o disminuye por alguna causa extraordinaria, su aumento incitará la sensación de *calor* y su disminución la del *frío*. Finalmente, según las diversas otras formas de estimulación de los filamentos, el alma experimentará las cualidades que se corresponden con el tacto en general, tales como la *humedad*, la *sequedad*, el *peso*, y demás.

Es necesario observar que a pesar de la extrema delgadez y excitabilidad de estas fibras, no lo son tanto como para que puedan transmitirle al cerebro todas las acciones más pequeñas que acontecen en la naturaleza; de hecho, las menores que se puedan transmitir al cerebro son las que producen las partes más toscas de los cuerpos terráneos. Incluso puede haber algunos cuerpos cuyas partes, aunque gruesas, se pudieran deslizar tan suavemente entre los filamentos que los presionaran o cortaran, pero sin que llegara su acción al cerebro. De igual modo, hay ciertas drogas que pueden corromper y adormecer los miembros en que se aplican, sin que sintamos sensación alguna [...]⁷

⁷ Sigue una explicación de los demás sentidos externos (el gusto, el olfato, el oído, la vista) y de las sensaciones internas (el hambre, la sed, la alegría y la tristeza). Para la teoría de la vista de Descartes

Ha llegado el tiempo de que empiece a explicar cómo los espíritus animales siguen su curso en las concavidades y los poros del cerebro y cuáles son las funciones que dependen del proceso.

Si alguna vez habéis sentido la curiosidad de observar de cerca los órganos de nuestras iglesias, habréis visto cómo los fuelles impulsan el aire hasta ciertos receptáculos, los llamados portavientos, y cómo desde allí el aire pasa a los tubos, entrando a veces en unos, a veces en otros, de acuerdo con las diversas formas en que el organista mueve sus dedos en el teclado. Ahora bien, puede pensarse que el corazón y las arterias que impulsan los espíritus animales hacia las concavidades del cerebro de nuestra máquina son como los fuelles de un órgano que impulsan el aire hacia los portavientos, y puede pensarse que los objetos exteriores, según los nervios que estimulen, conducen los espíritus que estas concavidades contienen hasta algunos de los poros, y que por lo tanto los objetos exteriores son como los dedos del organista que según la tecla que pulsen hacen entrar el aire en ciertos tubos desde los portavientos. Así como la armonía de un órgano no depende de la disposición exterior de los tubos ni de la forma de los portavientos, o de otras partes, sino solamente de tres factores, a saber, del aire que proviene de los fuelles, de los tubos que proporcionan el sonido y de la distribución del aire en los tubos, así también quiero advertiros que las funciones que nos ocupan no dependen para nada de la disposición externa de todas esas partes visibles que los anatomistas distinguen en la sustancia del cerebro, ni tampoco de la forma de las concavidades del cerebro, sino solamente de los espíritus que provienen del cerebro, de los poros del cerebro por donde pasan, y de la forma en que estos espíritus se distribuyen en los poros. Por lo tanto, sólo será necesario explicar por orden todo aquello que considero de mayor interés en relación con estas tres cosas [...] ⁸

Siendo la sustancia del cerebro blanda y flexible, sus concavidades serían muy estrechas y casi todas cerradas, tal como aparecen en el cerebro de un cadáver, si en ellas no penetrasen los espíritus. Pero la fuente que produce estos espíritus es comúnmente tan abundante que cuando van entrando en estas concavidades poseen la fuerza suficiente para hacer presión sobre la materia circundante y expandirla, tensando los pequeños filamentos de los nervios que de allí salen, del mismo modo que un viento moderado puede hinchar las velas de un navío, tensando

véase su tratado de la *Óptica*; para su teoría de los otros sentidos externos véase los *Principios de la filosofía*, parte 4, arts. 192-194, y para la teoría de las sensaciones internas véase el *Tratado de las pasiones*, *passim*.

⁸ Sigue la descripción de los espíritus animales y de cómo los afectan la digestión, la respiración y otras funciones corporales; también, la descripción de los poros del cerebro y del movimiento de los espíritus a través de los poros.

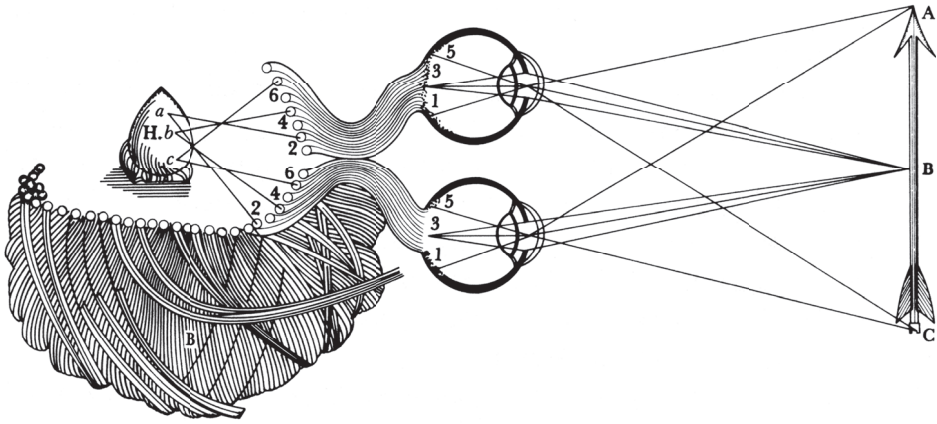


FIGURA II.2

el cordaje a que están unidas. De allí que si la máquina está dispuesta de tal modo que obedezca todas las acciones de los espíritus, entonces representa el cuerpo de un hombre *despierto*. Si los espíritus sólo tienen fuerza suficiente para tensar algunas de sus partes, mientras que otras permanecen relajadas, tal como sucede con las velas de un navío cuando el viento es demasiado débil para hincharlas, entonces la máquina representa el cuerpo de un hombre que *duerme* y que tiene *diversos sueños* al dormir [...]

Pero antes de referirme particularmente al *dormir* y a los *sueños*, deseo haceros considerar todo lo que sucede en el cerebro en el estado de vigilia, a saber, cómo se forman las ideas de los objetos en el lugar destinado a la *imaginación* y *sentido común*, cómo se guardan en la *memoria* y cómo causan el *movimiento de todos los miembros* [...]

A fin [...] de que comprendáis claramente cómo se forman las ideas de los objetos que impactan los sentidos, observad en este diagrama (figura II.2) las pequeñas redes 1-2, 3-4, 5-6 y semejantes que forman el nervio óptico, extendiéndose desde el fondo del ojo 1, 3, 5, hasta la superficie interna del cerebro 2, 4, 6. Observad que estos filamentos están dispuestos de tal forma que si los rayos que provienen, por ejemplo, del punto A del objeto, presionan el fondo del ojo en el punto 1, entonces estiran todo el filamento 1-2, aumentando la apertura del pequeño tubo 2; asimismo, los rayos procedentes del punto B aumentan la apertura del pequeño tubo 4, y así sucesivamente. Ya hemos descrito cómo, dependiendo de las varias formas en que estos rayos hacen presión en los puntos 1, 3, 5, se traza una figura en el fondo del ojo que se corresponde con el objeto ABC. Similarmente, es

obvio que, dependiendo de las diferentes formas en que los filamentos 1-2, 3-4, 5-6, etc., abran los pequeños tubos 2, 4, 6, una figura correspondiente se trazará también en la superficie interna del cerebro.

Considerad ahora que los espíritus que tienden a entrar en cada uno de los pequeños tubos 2, 4, 6, y semejantes, no provienen indiferentemente de todos los puntos en la superficie de la glándula H, sino de algunos específicamente; y que, por ejemplo, son los que provienen del punto *a* de esta superficie, los que tienden a entrar en el tubo 2; los de los puntos *b* y *c*, los que tienden a entrar en los tubos 4 y 6, y así sucesivamente. De manera que en el mismo momento en que la apertura de estos tubos se agranda, los espíritus comienzan a salir de los puntos correspondientes de la glándula con mayor facilidad y rapidez que anteriormente. Así como se traza una figura correspondiente a la del objeto ABC en la superficie interna del cerebro según las diferentes formas en que se abren los tubos 2, 4, 6, también se traza esa figura en la superficie de esta glándula según las formas en que los espíritus parten de los puntos *a*, *b*, *c*.

Advertid que por estas “figuras” no entiendo solamente las cosas que de algún modo representan la posición de las líneas y de la superficie de los objetos, sino también todas las que pueden hacer sentir al alma el movimiento, el tamaño, la distancia, los colores, los sonidos, los olores y otras cualidades, de acuerdo con lo que anteriormente expuse; incluso las que pudieran hacerle sentir la sensación del cosquilleo, del dolor, de la sed, de la alegría, de la tristeza, y otras pasiones semejantes. Pues es notorio que el tubo 2, por ejemplo, podría abrirse en forma distinta, tanto por la acción que según he dicho causa la sensación del color rojo o la del cosquilleo, como por la que causa la sensación del color blanco o del dolor; y los espíritus que salen del punto *a* tienden a dirigirse hacia este tubo en una forma distinta que se corresponde con la diferencia en su apertura, y así en los demás casos.

Ahora bien, respecto a estas figuras, no son las que se imprimen en los órganos de los sentidos externos o en la superficie interna del cerebro, sino solamente las que se trazan en la superficie de la glándula H, donde se encuentra la sede de la *imaginación* y del *sentido común*,⁹ las figuras que debemos tomar como ideas, es decir, como las formas o imágenes que el alma racional tomará en consideración cuando, estando unida a esta máquina, se imagine o sienta algún objeto.

Advertid que digo imagine o sienta, ya que entiendo de manera general, con el nombre de *idea*, todas las impresiones que pueden recibir los espíritus al salir

⁹ Véase el capítulo VI, nota 3.

de la glándula H, impresiones que se atribuyen todas al sentido “común” cuando dependen de la presencia de los objetos; pero pueden provenir de muchas otras causas, como más adelante lo explicaré, y en tal caso se deben atribuir a la imaginación.

Aquí podría añadir cómo las huellas de estas ideas pasan por las arterias hacia el corazón, irradiando toda la sangre; y cómo incluso se determinan por ciertas acciones de la madre, imprimiéndose en los miembros del niño que se forma en sus entrañas. Pero me limitaré a indicar cómo se imprimen en la parte interna del cerebro (llamada B en la figura II.2) donde se encuentra la sede de la memoria.

Considerad pues al respecto que los espíritus que han salido de la glándula H y que han recibido la impresión de alguna idea, luego pasan por los tubos 2, 4, 6 y similares hacia los poros o espacios existentes entre las pequeñas redes de que se compone esta parte B del cerebro. Estos espíritus tendrían la fuerza para dilatar un poco esos poros y para plegar y disponer en distintas formas las pequeñas redes que se encuentran en su trayecto, de acuerdo con las diversas formas en que se mueven y con las diversas aperturas de los tubos por los que fluyen. Así, también trazan figuras allí que se corresponden con las de los objetos, aunque no con la perfección ni la facilidad con que lo hacen en la glándula H, sino poco a poco y de modo cada vez más perfecto, según su acción sea más intensa y duradera, o se reitere con mayor frecuencia. Es por esto que las figuras tampoco se borran tan fácilmente, sino que se conservan de tal manera que, por su mediación, las ideas que estaban allí previamente puedan volverse a formar directamente mucho tiempo después, sin necesidad de la presencia de los objetos con que se corresponden. Y en esto consiste la *memoria* [...] ¹⁰

Antes de iniciar la descripción del alma racional, quisiera que reflexionaraís un poco en todo lo que he dicho acerca de esta máquina. Y que consideréis en primer lugar que no he supuesto que posea órgano alguno, ni resorte, que no sean semejantes a los nuestros, como también a los de algunos animales irracionales. Aquellos que se pueden percibir claramente por la vista ya han sido descritos por los anatomistas. En relación con lo que he dicho sobre la forma en que las arterias llevan a los espíritus hasta el interior de la cabeza, así como sobre la diferencia que existe entre la superficie interna del cerebro y la parte central de su sustancia, los anatomistas también podrán comprobar con la vista, si lo hacen

¹⁰ Sigue una explicación de la forma en que los espíritus animales forman ideas en la superficie de la glándula pineal, produciendo movimientos corporales como los de los hombres verdaderos, a pesar de la ausencia de un alma cualquiera. Véase el *Tratado de las pasiones*, parte 1, arts. 13-16, 21-24.

con atención, la existencia de indicios que eliminarán toda duda al respecto. Tampoco podrán cuestionar la existencia de esas pequeñas puertas o válvulas que ubico en los nervios a la entrada de cada músculo, si perciben con atención que la naturaleza ha colocado tales puertas en todos los lugares de nuestro cuerpo por donde comúnmente penetran las sustancias que pueden tener la tendencia de volver a salir, tales como la entrada del corazón, del hígado, de la garganta, de los intestinos gruesos y de las principales divisiones de todas las venas. Tampoco podrán imaginar nada tan plausible, en relación con el cerebro, como que se compone de pequeñas redes diversamente entretejidas, ya que todos los tipos de piel y de carne aparentemente se componen de diversas fibras o redes, y que lo mismo sucede en todas las plantas. Es al parecer una propiedad común de todos los cuerpos que pueden crecer y nutrirse gracias a la vinculación de las partes pequeñas de otros cuerpos. Finalmente, en relación con todas las demás cosas que he supuesto, y que no se pueden percibir por ningún sentido, son todas tan sencillas, tan comunes y tan pocas, que si las comparáis con la variada composición y el maravilloso artificio que existe en la estructura de los órganos visibles, tendréis más motivos para pensar que he omitido varias de las que poseemos, que para pensar que he supuesto alguna que no existe. Y sabiendo que la naturaleza obra siempre del modo más sencillo y más fácil, no creo que podáis juzgar que sea posible encontrar algunos que sean más parecidos a los que ella utiliza, que los que aquí se proponen.

Me gustaría que consideraseis, además, que todas las funciones que yo he atribuido a esta máquina, tales como la digestión de los alimentos, el latido del corazón y de las arterias, la nutrición y desarrollo de los miembros, la respiración, la vigilia y el dormir, la recepción por los órganos de los sentidos externos de la luz, de los sonidos, de los olores, de los sabores, del calor y de las demás cualidades similares; la impresión de su idea respectiva en el órgano del sentido común y de la imaginación; la retención o la huella que deja en la memoria; los movimientos internos de los apetitos y de las pasiones y, finalmente, los movimientos externos de todos los miembros —tanto las acciones de los objetos que se presentan ante los sentidos como las pasiones y las impresiones que se encuentran en la memoria— imitan en la forma más perfecta que sea posible las funciones de un verdadero hombre. Me gustaría, digo, que veáis todas estas funciones como la consecuencia natural de la disposición de los órganos en esta máquina; ni más ni menos que como sucede con los movimientos de un reloj o de un autó-mata, gracias a la disposición de sus contrapesos y sus ruedas. De modo y manera que no podemos concebir en esta máquina un alma vegetativa o sensible de nin-

gún tipo, ni ningún otro principio de movimiento y de vida, aparte de su sangre y de sus espíritus, que se agitan por el efecto del calor del fuego que arde continuamente en su corazón; fuego cuya naturaleza no difiere en absoluto de la de los fuegos que se encuentran en los cuerpos inanimados.

Immanuel Kant

III. CRÍTICA DEL JUICIO* (Fragmentos)**

DE LA FINALIDAD OBJETIVA QUE ES SIMPLEMENTE FORMAL, A DIFERENCIA DE LO QUE ES MATERIAL

Todas las figuras geométricas trazadas conforme a un principio, revelan una finalidad objetiva, muchas veces maravillosa por su variedad, es decir, que sirven para resolver muchos problemas con un solo principio, y cada uno de éstos de una manera infinitamente varia. La finalidad es aquí evidentemente objetiva o intelectual, y no simplemente subjetiva y estética. Porque ella expresa la propiedad que tiene la figura de engendrar muchas figuras propuestas, y es además reconocida por la razón. Mas la finalidad no constituye, sin embargo, la posibilidad del concepto del objeto mismo, es decir, que no se considera como siendo posible únicamente en relación con este uso.

Esta figura tan simple que se llama círculo contiene el principio de la solución de una multitud de problemas, de los que cada uno exigiría por sí muchos trabajos preparatorios, mientras que esta solución se ofrece por sí misma como una de las admirables e infinitamente numerosas propiedades de esta figura. Si se trata, por ejemplo, de construir un triángulo con una base dada y el ángulo opuesto, el problema es indeterminado, es decir, que se puede resolver de una manera infinitamente varia. Mas el círculo encierra todas estas soluciones del problema, como el lugar geométrico que suministra todos los triángulos que satisfacen las condiciones dadas. O bien, si se quiere que dos líneas se corten de tal

* Existe controversia sobre la traducción del título *Kritik der Urteilstkraft*. Así, han aparecido ediciones en español con los títulos *Crítica del juicio* (M. García Morente), *Crítica de la facultad de juzgar* (P. Oyarzún) o *Crítica del discernimiento* (R. Rodríguez Aramayo y S. Mas). [E.]

** La traducción de este capítulo ha sido tomada del libro *Crítica del juicio, seguida de las observaciones sobre el asentamiento de lo bello y lo sublime*, trad. de A. García Moreno y J. Ruvira, Nueva Biblioteca Filosófica, Madrid, 1876. [T.] El texto de la edición en inglés apareció originalmente en I. Kant, *Critique of the Power of Judgment*, edición de P. Guyer, trad. de P. Guyer y E. Matthews, Cambridge University Press, Cambridge, 2001.

suerte que el rectángulo formado por las dos partes de la una sea igual al formado por las de la otra, la solución del problema presenta mucha dificultad. Mas para que dos líneas se dividan en esta proporción, basta que se corten en el interior del círculo y terminen en su circunferencia. Las demás líneas curvas suministrarían también soluciones de este género, que no habría hecho concebir al pronto la regla conforme a la cual las construimos. Todas las secciones cónicas, cualquiera que sea la simplicidad de su definición, sea que se las considere en sí mismas, sea que se las refiera a sus propiedades, son fecundas en principios para la solución de una multitud de problemas posibles.

Causa un verdadero placer ver el ardor con que los antiguos geómetras investigaban las propiedades de esta especie de líneas, sin inquietarse por una cuestión propia de espíritus limitados: ¿qué bien nos trae este conocimiento? Así es, por ejemplo, que investigaban las propiedades de la parábola sin conocer la ley de la gravitación hacia la superficie de la tierra, que les hubiera suministrado la aplicación de la parábola a la trayectoria de los cuerpos solicitados por la gravedad (cuya dirección puede considerarse como paralela a sí misma en toda la duración de su movimiento). Así es también que estudiaban las propiedades de la elipse sin adivinar que en esto había también una gravitación para los cuerpos celestes, y sin conocer la ley que rige la gravedad de estos cuerpos en sus diversas distancias al centro de atracción y que hace que, aunque estén enteramente libres, se vean obligados a describir esta curva.

Trabajando así sin saberlo para la posteridad, gozaban al encontrar en la esencia de las cosas una finalidad cuya necesidad hubiesen podido mostrar *a priori*. Platón, maestro en esta ciencia, llega al entusiasmo tratándose de esta disposición originaria de las cosas cuyo descubrimiento puede exceder toda experiencia, y sobre la facultad que tiene el espíritu de poder llevar la armonía de los seres a su principio suprasensible (comprendiendo las propiedades de los números, con los que el espíritu juega en la música).

Este entusiasmo lo elevaba sobre los conceptos de la experiencia a la región de las ideas, que no le parecían explicables más que por un comercio intelectual con el principio de todos los seres.¹ No es extraño que excluyera de su escuela los que no sabían geometría; porque lo que Anaxágoras deducía de los objetos de la experiencia y de su enlace final pensaba derivarlo de una intuición pura, inherente al espíritu humano.² La necesidad en la finalidad, es decir, la finalidad de las

¹ Para la opinión de I. Kant sobre la teoría de las ideas de Platón, véase la *Crítica de la razón pura*, A313-19/B.

² Véase la crítica a Anaxágoras que Sócrates plantea en *Fedón* 98b-c: "Veo que el hombre no recurre en

cosas que se hallan dispuestas como si hubiesen sido hechas a propósito para nuestro uso, pero que parecen, sin embargo, pertenecer originariamente a la esencia de las cosas sin tener en cuenta nuestro uso, he aquí el principio de la gran admiración que nos causa la naturaleza, menos todavía fuera de nosotros, que en nuestra propia razón. Además es un error muy excusable pasar insensiblemente de esta admiración al fanatismo.

Mas aunque esta finalidad intelectual sea objetiva (y no subjetiva como la finalidad estética), no podemos concebirla, en cuanto a su posibilidad, más que como formal (no como real), es decir, sólo como una finalidad a la cual no es necesario dar un fin, una teleología por principio, sino que basta concebirla de una manera general. El círculo es una intuición que el entendimiento determina conforme a un principio; la unidad de este principio, que yo admito arbitrariamente y de la cual me sirvo como de un concepto fundamental, aplicada a una forma de la intuición (al espacio), que sin embargo no se encuentra en mí más que como una representación, pero como una representación *a priori*, esta unidad hace comprender la de muchas reglas, que derivan de la construcción de este concepto y que son conformes a muchos fines posibles, sin que haya necesidad de suponer para esta finalidad un fin o algún otro principio. Del mismo modo no lo hay cuando hallo el orden y la regularidad en un conjunto de cosas exteriores, encerrado en ciertos límites; por ejemplo, en un jardín, el orden y la regularidad de los árboles, de los parterres, de los paseos; yo no puedo esperar deducirlos *a priori* de una circunscripción arbitraria de un espacio, porque estas son cosas existentes, que no pueden ser conocidas más que por medio de la experiencia, y no se trata, como ahora, más que de una simple representación determinada en mí *a priori*, conforme a un principio. Es porque esta última finalidad (la finalidad empírica) en tanto que real depende del concepto de un fin.

Pero se ve también la razón legítima de nuestra admiración por esta misma finalidad que percibimos en la esencia de las cosas (en tanto que sus conceptos pueden ser contruidos). Las reglas variadas cuya unidad (fundada sobre un principio) causa admiración, son todas sintéticas, y no derivan de un concepto del objeto, por ejemplo, del círculo, sino que necesitan que este concepto sea dado en la intuición. Mas por lo mismo, esta unidad tiene trazas de hallarse fundada empíricamente sobre un principio diferente de nuestra facultad de repre-

absoluto a la inteligencia ni le atribuye ninguna causalidad en la ordenación de las cosas, sino que aduce como causas aires, éteres, aguas y otras muchas cosas absurdas". [Tomado de Platón, *Diálogos*, III: *Fedón*, *Banquete*, *Fedro*, trads., introd. y notas de C. García Gual, M. Martínez Hernández y E. Lledo Íñigo, Madrid, Gredos, 1986 (E.).]

sentación, y se diría entonces que la concordancia del objeto con la necesidad de las reglas, inherente al entendimiento, es contingente en sí, y por consiguiente no es posible más que por un fin establecido expresamente para esto. Por lo que esta armonía, no siendo, sin embargo de toda esta finalidad, reconocida empíricamente, sino *a priori*, debería conducirnos por sí misma a la conclusión de que el espacio, cuya determinación sólo hace posible el objeto (por medio de la imaginación y conforme a un concepto) no es una cualidad de las cosas fuera de nosotros, sino un simple modo de representación en nosotros, y que de este modo en la figura que yo trazo conforme a un concepto, es decir, en mi propia manera de representarme lo que me es dado exteriormente, aunque esto pudiese en sí, soy yo quien introduce la finalidad sin estar instruido de ello empíricamente por la cosa misma, y por consiguiente, sin tener para ello ningún fin particular fuera de mí en el objeto. Pero como esta consideración exige ya un uso crítico de la razón, y por consiguiente no se sobrentiende al principio en el juicio que formamos del objeto conforme a sus propiedades, este juicio no me da inmediatamente más que la unión de reglas heterogéneas (aun en lo que ellas tienen de heterogéneo) en un principio particular que descansa *a priori* fuera de mis conceptos, y en general de mi representación. Por lo que la sorpresa viene de que el espíritu queda en suspenso por la incompatibilidad de una representación y de la regla dada por la misma con los principios que le sirven ya de fundamento, y por esto llega a dudar si ha visto o juzgado bien; mas la admiración es una sorpresa que no cesa nunca, ni aun después de la desaparición de esta duda. Por consiguiente, la admiración es un efecto completamente natural de esta finalidad que observamos en la esencia de las cosas (consideradas como fenómenos), y no se puede condenar, porque no solamente nos es imposible explicar por qué la unión de esta forma de la intuición sensible (que se llama el espacio) con la facultad de los conceptos (el entendimiento) es precisamente tal y no otra, sino que esta unión misma extiende el espíritu haciéndole como presentir algo todavía que descansa sobre estas representaciones sensibles, y que puede contener el último principio (desconocido para nosotros) de este acuerdo. No tenemos ciertamente necesidad de conocerlo cuando simplemente se trata de la finalidad formal de nuestras representaciones *a priori*; mas la sola necesidad en que estamos de pensar en él excita la admiración por el objeto que nos la impone.

Se acostumbra llamar bellezas las propiedades de que hemos hablado, las de las figuras geométricas como las de los números, a causa de cierta finalidad que muestran *a priori* para diversos usos del conocimiento, y que la simplicidad de su construcción no hubiera hecho sospechar. Así, por ejemplo, se habla de tal o cual

bella propiedad del círculo, que se descubriría de esta o la otra manera; mas esto no es allí un juicio estético de finalidad; esto no es uno de los juicios sin concepto que no indican más que una finalidad subjetiva en el libre juego de nuestras facultades de conocer; esto es un juicio intelectual, fundado sobre conceptos, que da claramente a conocer una finalidad objetiva, es decir, una conformidad con los diversos objetos (infinitamente varios). Esta propiedad debería llamarse con más razón perfección relativa que belleza de una figura matemática. En general, apenas se puede admitir la expresión de belleza intelectual, porque la palabra belleza perdería entonces todo sentido determinado, o la satisfacción sensible. El nombre de belleza convendría mejor a la demostración de estas propiedades; porque por esta demostración, el entendimiento en tanto que facultad de los conceptos, y la imaginación en tanto que facultad que suministra la exhibición de estos conceptos, se sienten fortificados *a priori* (éste es el carácter que junto con la precisión que lleva la razón llamamos la elegancia de la demostración): aquí al menos, si la satisfacción tiene su principio en los conceptos, es subjetiva, mientras que la perfección produce una satisfacción objetiva.

DE LA FINALIDAD DE LA NATURALEZA QUE NO ES
MÁS QUE RELATIVA, A DIFERENCIA DE LA QUE ES INTERIOR

La experiencia lleva nuestra facultad de juzgar el concepto de una finalidad objetiva y material, es decir, el concepto de un fin de la naturaleza; entonces es solamente cuando tenemos, para juzgar, una relación de causa a efecto³ que no somos capaces de comprender sin suponer en la causalidad de la causa misma la idea del efecto como la condición de la posibilidad de este efecto o el principio que determina su causa a producirle. Mas esto puede hacerse de dos modos: se considera el efecto, o inmediatamente como una producción hecha con arte, o solamente como una materia destinada al arte de otros seres posibles de la naturaleza, y por consiguiente, o como un fin, o como un medio para la finalidad de otras causas. Esta última finalidad se llama utilidad (por lo que se refiere a los hombres), y aun conveniencia (por lo que se refiere a otros seres), y no es más que relativa, mientras que la primera es una finalidad interior de la naturaleza.

³ Ya que en las matemáticas puras nunca se puede plantear el problema de la existencia de las cosas, sino sólo de su posibilidad, a saber, la posibilidad de una intuición que se corresponda con su concepto, y que por ende jamás pueda ser una cuestión de causa y efecto, toda la intencionalidad que allí se ha observado debe pues considerarse como meramente formal y nunca como una finalidad natural [Kant]. [Las notas así señaladas provienen del manuscrito original de Kant; aquí se traducen desde el inglés (T.)]

Los ríos, por ejemplo, llevan consigo tierras útiles a la vegetación, que depositan alguna vez en los campos por donde pasan, muchas veces también en su desembocadura. En muchos países las olas arrojan el limo a la costa, o lo depositan en la orilla; y principalmente cuando los hombres tienen cuidado de que el reflujo no lo vuelva a arrastrar, la tierra allí viene a ser más fértil, y la vegetación toma el puesto que ocupaban los peces y los testáceos. Así es que la naturaleza ha producido por sí misma la mayor parte de los aumentos de terreno, y continúa todavía, aunque lentamente. Por lo que la cuestión es saber si estos aluviones deben ser considerados como fines de la naturaleza, a causa de su utilidad para los hombres, porque no se puede hablar de la ventaja que de esto resulta para la misma vegetación, puesto que lo que ésta gana, los animales del mar lo pierden.⁴

O bien, para presentar un ejemplo de la conveniencia de ciertas cosas de la naturaleza para otros seres, en relación con las cuales pueden considerarse como medios, decir que no hay mejor terreno para los pinos que un terreno arenoso, por lo que el océano, antes de retirarse de la tierra, ha dejado tantas capas de arena en nuestras comarcas del norte, que han podido elevarse sobre suelos extensos bosques de pinos cuya tierra, por lo demás, es impropia para toda cultura, y acusamos muchas veces a nuestros antepasados de haberlos destruido sin razón. Se puede preguntar si este antiguo depósito de capas de arena era un fin de la naturaleza, trabajando en favor de los bosques de pinos que más tarde allí pudieran formarse. Lo cierto es que si hay necesidad de ver allí un fin de la naturaleza, se debe mirar también esta arena como un fin, pero solamente como un fin relativo que a su vez tenía por medios la antigua rivera y la retirada del mar; porque en la serie de miembros de una relación final subordinados entre sí, cada miembro intermedio debe considerarse como un fin (mas no como fin último), cuya causa más próxima es el medio. Así, también, si debía haber en el mundo bueyes, cabras, caballos y otros animales de este género, era necesario que hubiese también yerba sobre la tierra; y si debía haber camellos, era necesario que hubiese en los desiertos plantas propias para alimentarlos; y además era necesario que estos animales y otras especies de herbívoros existiesen en abundancia para que pudiera haber lobos, tigres y leones. Por consiguiente, la finalidad objetiva que se funda sobre esta relación no es una finalidad objetiva de las cosas en sí, como habría que admitir si por ejemplo no se pudiese concebir la arena en sí misma como un

⁴ Para la explicación de Kant sobre los efectos geológicos de los ríos y los mares, véase *Der einzig mögliche Beweisgrund zu einer Demonstration des Daseins Gottes* [El único argumento posible para una demostración de la existencia de Dios], 2: 128-129, y *Physische Geographie* [Geografía física] (los apuntes de las clases de geografía de Kant, que en 1802 recopiló F. T. Rink), 9: 296-299.

efecto del mar, que es la causa de ella, sin suponer un fin a ésta y sin considerar el efecto, a saber, la arena como una cosa hecha con arte. Es una finalidad que no es más que relativa, y no existe más que accidentalmente en la cosa a que se atribuye; y aunque entre los ejemplos citados se debía mirar la yerba como una producción organizada de la naturaleza, por consiguiente, como una cosa hecha con arte en su relación con los animales que se alimentan de ella, no debe considerarse más que como una materia bruta.

Pero cuando, en fin, el hombre, gracias a la libertad de su causalidad encuentra las cosas de la naturaleza útiles para sus designios, en verdad muchas veces extravagantes (como cuando se sirve de plumas de aves para engalanarse y tierras de color y jugos de las plantas para acicalarse), pero alguna vez también razonables, como cuando se sirve del caballo para viajar, del buey y aun del asno y del cochino (así como se hace en la isla de Menorca) para labrar, no se puede admitir aun en esto un fin relativo de la naturaleza (para este uso). Porque su razón sabe hacer concurrir las cosas con las representaciones de la fantasía, a las cuales no estaban predestinadas por su naturaleza. Solamente si se admite que debe haber hombres sobre la tierra, los medios al menos, sin los que los hombres no podrían existir, en tanto que animales, y aun en tanto que seres racionales (en cualquier grado, por débil que sea), no pueden faltar; mas entonces las cosas de la naturaleza que son indispensables para este uso deben considerarse también como fines de la misma.

Se ve claramente con esto que la finalidad exterior (la utilidad de una cosa por medio de otras) no puede considerarse como un fin exterior de la naturaleza, más que a condición de que la existencia de la cosa, a la cual se refiere de cerca o de lejos, sea por sí misma un fin de la misma. Mas como esto no se puede jamás demostrar por la simple consideración de la naturaleza, se sigue que la finalidad relativa, aunque nos haga hipotéticamente pensar en los fines de aquélla, no puede legítimamente dar lugar a ningún juicio teleológico absoluto.

La nieve en los países fríos defiende los sembrados contra la helada y facilita el comercio de los hombres (por medio de los trineos). Los lapones se sirven por esto de ciertos animales (los renos), que hallan un alimento suficiente en un musgo seco, que saben sacar debajo de la nieve, y que se dejan fácilmente amansar y domar, aunque podrían también vivir en libertad. Para otros pueblos situados en la misma zona glacial, el mar contiene una rica provisión de animales que les sirven para alimentarse y vestirse, y aun les suministran materias inflamables que les sirven para calentar sus chozas, que construyen con la madera que el mar les trae. Por lo que hay en esto un concurso admirable de relaciones de la naturaleza

a un fin, y este fin es el groenlandés, el lapón, el samoyedo o samoida, el yácula o cualquier otro pueblo. Mas no se ve por qué, en general, debe haber hombres en estas comarcas. Es por lo que se formaría un juicio muy atrevido y arbitrario, diciendo que si los vapores formados por el aire caen en este país bajo la forma de nieve, que si la mar tiene corrientes que llevan la madera venida de los países cálidos, y que si encierra grandes animales llenos de aceite, es porque la causa que produce todas las cosas de la naturaleza ha tenido por principio la idea de venir en ayuda de ciertas pobres criaturas. Porque aun cuando no existiesen todas estas ventajas de la naturaleza, no tendríamos fundamento para hallar las causas de la naturaleza insuficientes para nuestra utilidad, y nos parecería, por el contrario, una temeridad y una falta de consideración pedir a la naturaleza una disposición de este género y atribuirle un fin semejante (atendiendo a que únicamente la discordia ha podido arrojar a los hombres a comarcas tan inhospitalarias).⁵

DEL CARÁCTER PROPIO DE LAS COSAS,
EN TANTO QUE FINES DE LA NATURALEZA

Para concebir que una cosa no es posible más que como fin, es decir, que la causalidad a que debe su origen no hay que buscarla en el mecanismo de la naturaleza sino en una causa cuyo poder sea determinado por conceptos, es necesario que la posibilidad de la forma de esta cosa no se pueda sacar de simples leyes de la naturaleza, es decir, de leyes que nuestro solo entendimiento pueda reconocer en su aplicación a los fenómenos; es necesario que el conocimiento empírico de esta forma, considerada en su causa y como efecto, suponga conceptos de la razón.⁶ Esta forma es contingente a los ojos de la razón que la refiere a todas las leyes de la naturaleza, es decir, que la razón que debe también buscar la necesidad

⁵ Compárese este párrafo con *Zum ewigen Frieden [Sobre la paz perpetua]*, 8: 363-365. Ya en *El único argumento posible...*, 2: 131, Kant había argumentado que es un error inferir, directamente del hecho de que ciertas condiciones naturales parecen ser ventajosas para los seres humanos, la conclusión de que hubieran sido intencionalmente diseñadas para que así fueran.

⁶ En *El único argumento posible...* Kant había diferenciado el caso en que una armoniosa diversidad de efectos surge de una sola ley, para él característico de la naturaleza inanimada, del caso en que una armonía de efectos surge de tipos de causación específicos, para él característico de los objetos inanimados en la naturaleza (2: 107-108); sin embargo, Kant había argumentado seguidamente que nuestra incapacidad para explicar todo lo que se da en la naturaleza de acuerdo con leyes mecánicas no debería considerarse como una base válida para la creencia en una base supersensible de la naturaleza, puesto que tal base supersensible —que sin duda esta obra propone y plantea— podría alcanzar todos sus efectos intencionados en la naturaleza mediante las funciones mecánicas de las leyes que instituye como las condiciones mismas de la posibilidad de la naturaleza (véase 2: 114-115).

en la forma de toda producción de la naturaleza, en este caso que no quiere más que percibir las condiciones ligadas a esta producción; no puede, sin embargo, admitir esta necesidad en la forma dada; esta misma contingencia es la que nos determina a considerar la causalidad de tal forma como si no fuese posible más que por la razón. Pero esta es la facultad de obrar conforme a los fines (la voluntad), y el objeto que no se representa como posible más que por esta facultad, no será representado así, como posible, mas que en tanto sea fin.

Si alguien percibe en un país que parezca inhabitado una figura geométrica, como un hexágono regular, trazado sobre la arena, su reflexión, ejercitándose sobre el concepto de esta figura, notará aunque de una manera confusa, con la ayuda de la razón, la unidad del principio de la producción de este concepto, y entonces, conforme a la razón, no podrá buscar el principio de la posibilidad de esta figura en las cosas que conoce como la arena, la mar vecina, los vientos o aun las huellas de los animales, o en otra causa privativa de la razón. Porque la contingencia de este acuerdo de una forma con un concepto, que no es posible más que en la razón, lo parecería tan infinitamente grande que sería como si no hubiera para producir la ley de la naturaleza; y por consiguiente, el principio de la causalidad de un efecto semejante no puede buscarse en el puro mecanismo de la naturaleza, sino en un concepto del objeto, que sólo la razón puede suministrar, y con el cual sólo ella puede compararle, y así es que se puede considerar este efecto como un fin, no ciertamente como un fin de la naturaleza, sino como un producto del arte (*vestigium hominis video*).⁷

Mas para que una cosa, en la cual se reconoce una producción de la naturaleza, pueda al mismo tiempo ser juzgada como un fin, por consiguiente, como un fin de la naturaleza, es necesario, si no hay en esto nada de contradictorio, algo más todavía. Diremos provisionalmente que una cosa existe como fin de la natu-

⁷ “Yo lo veo como vestigio de un ser humano” [Kant]. Anteponiendo el valor del saber a la apariencia de los objetos naturales, Cicerón escribe: “¿Quién, en verdad, consideraría que alguien es [...] más dichoso que el que se ha librado de toda perturbación del alma, o de fortuna más firme que el que posee lo que, como dicen, puede llevar consigo incluso después de un naufragio? [...] De modo que aquello de Platón, o tal vez lo dijo algún otro, me parece que es muy selecto. Dicen que, como una tempestad lo hubiese arrojado desde alta mar a tierras ignotas y a un litoral desierto, mientras los demás se hallaban temerosos por el desconocimiento de los lugares, advirtió que estaban trazadas en la arena ciertas figuras geométricas; que, tan pronto como las vio, exclamó que tuvieran buen ánimo, pues veía vestigios de hombres. Vestigios que por supuesto interpretaba no a partir de la siembra del campo, que miraba, sino a partir de los indicios de doctrina” (*De republica*, I, 28-29). [Tomado de M. T. Cicerón, *De la república*, introd., trad. y notas de J. Pimentel Álvarez, 2ª ed., UNAM, México, 2010. (E).] De acuerdo con la edición de Harvard University Press —Cicero, *On the Republic. On the Laws*, trad. de C. W. Keyes, HUP, Cambridge, 1928—, la anécdota también se encuentra en Vitruvio, *De architectura*, VI, donde se le atribuye a Aristipo (435-366 a. C.) en vez de Platón.

raleza cuando es la causa y el efecto de sí misma, porque hay aquí una causalidad que no se puede relacionar con el simple concepto de la naturaleza sin suponer un fin a ésta; pero que se puede a esta condición, cuando no comprender, al menos concebir sin contradicción. Antes de analizar completamente esta idea de un fin de la naturaleza, expliquémosla ahora por medio de un ejemplo.⁸

En primer lugar, un árbol produce otro, conforme a una ley conocida de la naturaleza. Mas el árbol que produce es de la misma especie, y así él se produce por sí mismo en cuanto a la especie; se conserva siempre en esta misma especie, de un lado como un efecto, del otro como causa, incesantemente reproducida por sí misma y reproduciéndose siempre.

En segundo lugar, un árbol se produce por sí mismo como individuo. Esta especie de efecto no es, en verdad, más que el crecimiento; mas este crecimiento es enteramente diferente de todo aumento producido por las leyes mecánicas, que se parece a una producción, bajo otro nombre. Esta planta elabora la materia que emplea para su crecimiento, de manera que se la asimila, es decir, de manera que le da la cualidad que le es específicamente propia, y que fuera de ella no puede suministrar el mecanismo de la naturaleza y se desenvuelve de este modo por una materia que, en virtud de esta asimilación, es su propio producto. Porque, si relativamente a las partes constitutivas que recibe de la naturaleza exterior esta materia no puede considerarse más que como una educación, se halla, sin embargo, en la elección y en la nueva composición de esta materia bruta tal originalidad, que todo el arte del mundo no basta cuando se busca para reconstituir una producción del reino vegetal con los elementos que ha separado al descomponerla, o con la materia que la naturaleza suministra para alimentarla.

En tercer lugar, una porción de estos seres se producen por sí mismos, de tal suerte que la conservación de los unos depende de la conservación de los otros. Un botón, sacado de la rama de un árbol e injerto sobre la rama de otro, produce sobre una planta extraña una planta de su especie, y del mismo modo una aguja sobre un tronco extraño. Por esto se puede considerar en el mismo árbol cada rama o cada hoja como simplemente habiendo sido injertadas sobre este árbol, y por consiguiente, como un árbol que existe por sí mismo que solamente se refiere a otro y es su parásito. Además las hojas son, en verdad, productos del árbol, mas a su vez lo conservan también; porque se le destruiría despojándole con frecuencia de sus hojas, y su crecimiento depende de un efecto sobre el tronco. No mencionaremos aquí más que de paso, aunque se deben colocar entre las propiedades

⁸ Kant utilizó por vez primera el ejemplo del árbol para ilustrar los problemas de la explicación en *El único argumento posible...*, 2: 114-115.

más sobresalientes de los seres organizados, estos recursos que la naturaleza les lleva por sí misma para repararlos, cuando la falta de una parte necesaria para la conservación de las partes inmediatas se llena por las demás, y estos defectos de organización o estas deformidades, en las cuales ciertas partes remedian los vicios de constitución o los obstáculos, se forman de una manera completamente nueva para conservar lo que es y para producir un ser anormal.

LAS COSAS, EN TANTO QUE FINES DE LA NATURALEZA,
SON SERES ORGANIZADOS

Conforme al carácter indicado en la sección precedente, para que una cosa que es una producción de la naturaleza no pueda reconocerse posible más que como un fin de la misma, es necesario que contenga una relación recíproca de causa o efecto; mas ésta es aquí una expresión un tanto impropia e indeterminada, que necesita reducirse a un concepto determinado.

La relación causal, en tanto que se la concibe simplemente por el entendimiento, constituye una serie (de causas y de efectos) que va siempre en descenso; y las cosas que como efectos presuponen otras como causas no pueden ser recíprocamente causas de éstas. Se llama esta relación causal relación de causas eficientes (*nexus effectivus*). Mas de otro lado se puede concebir también una relación causal determinada por un concepto racional (de fines) que, considerada como una serie, encerraría una dependencia ascendente y descendente, es decir, que la cosa que se designa como efecto merece también, ascendiendo, el nombre de causa de esta misma cosa de la que es ella el efecto. En la práctica (o en el arte) se halla fácilmente este género de relación: por ejemplo, la casa es en verdad la causa del alquiler que se recibe; mas también la representación de esta renta posible ha sido la causa de la construcción de esta casa.⁹ Esta nueva relación causal se llama relación de causas finales (*nexus finalis*). Será quizá mejor nombrar la primera relación de causas reales, y la segunda relación de causas ideales, puesto que esta denominación da a entender que aquí no puede haber más que dos especies de causalidad.

⁹ Kant alega que sólo podemos formar originalmente el concepto de la intencionalidad sobre la base de nuestras propias acciones intencionales, en su ensayo de 1788, *Über den Gebrauch teleologischer Prinzipien in der Philosophie* [Sobre el uso de principios teleológicos en la filosofía], 8: 181. Pero el ejemplo de Kant se remonta a la Antigüedad: Aristóteles utilizó el ejemplo de la construcción de una casa en su *Física*, libro II, capítulo 3, 195b3-5, 20-21.

En una cosa que debe considerarse como un fin de la naturaleza, es necesario, en primer lugar, que las partes que comprende (en cuanto a su existencia y a su forma) no sean posibles más que por su relación con el todo. Porque la cosa misma, siendo un fin, es comprendida bajo un concepto o una idea que debe determinar *a priori* todo lo que debe hallarse en ella contenido. Mas en tanto que uno se limita a concebir una cosa como posible de esta manera, es simplemente una obra de arte, es decir, la producción de una causa racional que es distinta de la materia (de las partes) de estas cosas, y que (en la unión y combinación de ellas) ha sido determinada por la idea de un todo posible de esta manera (y no por la naturaleza exterior).¹⁰

Por consiguiente, para que una cosa, en tanto que producción de la naturaleza, contenga en sí misma y en su posibilidad interior una relación a los fines, es decir, no sea posible más que como fin de la naturaleza, y no haya necesidad de la causalidad de los conceptos de seres racionales fuera de ella, se necesitará, en segundo lugar, que las partes de la cosa concurren a la unidad del todo, mostrándose recíprocamente causa y efecto de su forma. Porque sólo de esta manera es como recíprocamente la idea del todo puede determinar la forma y relación de todas las partes, no como causa —porque esto sería entonces una producción del arte— sino como un principio que determina por el que juzga la cosa el conocimiento de la unidad sistemática de la forma y la relación de los diversos elementos contenidos en la materia dada.

Así un cuerpo no puede ser juzgado en sí mismo y en su posibilidad interior, como un fin de la naturaleza, a menos que las partes de este cuerpo no se produzcan todas recíprocamente en su forma y en su relación, y no produzcan de este modo, por su propia causalidad, un todo cuyo concepto pueda a su vez ser juzgado como la causa o el principio de esta cosa en un ser que contiene la causalidad necesaria para producirla conforme a conceptos, de tal suerte que el enlace de las causas eficientes puede ser juzgado al mismo tiempo como un efecto producido por las causas finales.

En una producción de la naturaleza de esta especie, cada parte será concebida como no existiendo más que por las demás y por el todo, del mismo modo que cada una no existe más que para las otras, es decir, que se la concebirá como un órgano. Mas esta condición no basta (porque es también del arte y de todo fin en

¹⁰ Kant enfatiza tanto la analogía entre un ente viviente y una obra de arte, como las limitaciones de tal analogía, las cuales está a punto de explicar, en una nota de *Die Religion innerhalb der Grenzen der bloßen Vernunft* [La religión dentro de los límites de la mera razón], 6: 64-65n, nota que termina con una alusión al presente argumento.

general). Es necesario, además, que cada parte sea un órgano que produzca las demás partes (y recíprocamente). No hay, en efecto, instrumento del arte que lleve esta condición; no hay más que la naturaleza, la cual suministra a los órganos (aun a los del arte), toda su materia. Es, pues, en tanto que ser organizado y organizándose por sí mismo como una producción podría llamarse un fin de la naturaleza.

En un reloj, una parte es el instrumento que sirve para el movimiento de las demás, pero ninguna rueda es la causa eficiente de la producción de las otras; una parte existe a causa de otra, mas no por ésta; es porque también la causa productiva de estas partes y de su forma no reside en la naturaleza (de esta materia) sino fuera de ella, en un ser que puede obrar conforme a las ideas de un todo posibles por su causalidad. Y como en el reloj una rueda no produce otra, con más razón un reloj no produce otros, empleando para esto otra materia (que él organizaría); además no reemplaza por sí mismo las partes destruidas, ni repara los vicios de su construcción primitiva con la ayuda de las demás, ni se reorganiza por sí mismo cuando se ha desordenado: cosas que podemos esperar, por el contrario, de la naturaleza organizada. Un ser organizado no es, pues, una simple máquina, no teniendo más que la fuerza motriz; posee en sí una virtud creadora y la comunica a las materias que no la tienen (organizándolas), y esta virtud creadora que se propaga no puede ser explicada por la sola fuerza motriz (por el mecanismo).¹¹

Cuando se llama a la naturaleza y a la virtud que revela en sus producciones organizadas un análogo del arte, se dice muy poco, porque entonces el artista (un ser racional) se concibe fuera de ella. La naturaleza se organiza por sí misma, y en cada especie de sus producciones organizadas sigue en general el mismo ejemplar, pero también con las diferencias que exige la conservación de sí misma según las circunstancias. Quizá estemos más cerca de esta impenetrable cualidad cuando se le llama un análogo de la conducta; pero entonces es necesario conceder a la materia en tanto que simple materia una propiedad (el hilozoísmo) que repugna a su esencia, o bien asociarla a un principio extraño (el alma) que está con ella en una comunidad; y en este último caso, para que se pueda mirar una producción de la naturaleza, es necesario suponer ya la materia organizada como instrumento de esta alma, y por este medio no se explica esta materia misma, o bien es necesario hacer del alma la obrera de esta obra y elevar así la producción a la natu-

¹¹ Para el concepto de la naturaleza y los límites de las fuerzas mecánicas véase *Metaphysische Anfangsgründe der Naturwissenschaft* [Principios metafísicos de la ciencia de la naturaleza], “Observaciones generales sobre la dinámica”, especialmente 4: 525, 530, 532 a 533.

raleza (corporal). Hablando con propiedad, la organización de la naturaleza no tiene nada de análogo con ninguna de las cualidades que conocemos.^{*12} La belleza de la naturaleza, no atribuyéndose a los objetos más que relativamente a nuestra propia reflexión sobre la intuición exterior de estos objetos, y por consiguiente, no refiriéndose más que a la forma de su superficie, se puede llamar con razón un análogo del arte. Mas la perfección natural interna que poseen estas cosas que no son posibles más que como fines de la naturaleza, y que por esta razón son llamados seres organizados, no tiene nada de análogo con ninguna propiedad física o natural que conocemos, y aunque en el sentido más lato nosotros pertenecemos a la naturaleza, no se puede concebirla y explicarla exactamente por analogía con el arte humano.

El concepto de una cosa como fin de la naturaleza en sí no es, pues, un concepto constitutivo del entendimiento o la razón, pero puede ser un concepto regulador para el juicio reflexivo, es decir que puede dirigirnos en la investigación de esta especie de objetos y en la averiguación de su principio supremo, con la ayuda de una analogía separada de nuestra propia causalidad, obrando conforme a los fines. Esto ciertamente no sirve al conocimiento de la naturaleza o de su origen, sino más bien a esta facultad práctica de la razón que nos hace concebir por analogía la causa de esta finalidad.

Los seres organizados son, pues, los únicos en la naturaleza, que considerados en sí mismos e independientemente de toda relación con otras cosas, no se pueden concebir como posibles más que, en tanto que fines de la naturaleza, y que dan de este modo al concepto de un fin, no práctico sino natural, realidad objetiva, y por tanto, a la ciencia de la naturaleza el fundamento de una teleología. Por donde es necesario entender un cierto modo de juzgar los objetos de la naturale-

* Uno puede, por otro lado, iluminar cierta asociación, aunque una que se encuentra más en la idea que en la realidad, mediante una analogía con los fines inmediatos de la naturaleza que se han mencionado. Así, en el caso de una recientemente lograda transformación fundamental de un gran pueblo en una nación, el vocablo organización con frecuencia ha sido usado muy adecuadamente para la institución de las magistraturas, etc., e incluso de todo el cuerpo político. Ya que en tal conjunto cada miembro ciertamente sería no sólo un medio, sino que al mismo tiempo un fin, y, en la medida que contribuyera a la posibilidad del conjunto, su posición y función también estarían determinadas por la idea del conjunto.

¹² La nota anterior podría referirse a cualquiera de las dos recientes revoluciones cuyo curso Kant había seguido con gran interés, la Revolución estadounidense de 1776-1783, o la Revolución francesa, que se hallaba en sus inicios cuando Kant escribió la presente obra. Pero parecería algo extraño que Kant describiera la Revolución estadounidense como la transformación de un “gran pueblo” (*Volk*) en una nación, ya que la población estadounidense, que en todo caso no apoyaba toda ella a la revolución, probablemente no podía considerarse por Kant como un solo “pueblo” o “nación”. Años más tarde, cuando Kant habló del peligro de que la anarquía destruyera la organización de un pueblo antes de que se pudiera sustituir con otra, es claro que pensaba en las etapas finales de la Revolución francesa (véase *Teoría y práctica*, 8: 302n).

za conforme a un principio particular, que no habría sin esto el derecho de introducir en la naturaleza (puesto que no se puede percibir *a priori* la posibilidad de esta especie de causalidad).

DEL PRINCIPIO DEL JUICIO DE LA FINALIDAD INTERIOR EN LOS SERES ORGANIZADOS

Este principio puede definirse o anunciarse de este modo: una producción organizada de la naturaleza es aquella en la cual todo es recíprocamente fin y medio.¹³ Nada hay en ella inútil, sin objeto, esto es, que no deba referirse a un mecanismo ciego de la naturaleza.

Este principio, considerado en su origen, debe ciertamente derivarse de la experiencia, de esta experiencia que se establece metódicamente y que se llama observación; mas la universalidad y la necesidad que se afirma de esta especie de finalidad prueban que no descansa únicamente sobre principios empíricos, sino que tiene por fundamento algún principio *a priori*, aun cuando éste no sea más que un principio regulador y estos fines no residan más que en la idea de los que juzgan y no en una causa eficiente. Se puede, pues, llamar a este principio una máxima del juicio de la finalidad interna de los seres organizados.

Se sabe que los que disecan las plantas y los animales para estudiar en ellos la estructura y poder reconocer por qué y con qué fin les han sido concedidas ciertas partes, por qué tal disposición y tal colocación de las mismas, y precisamente esta forma interior, admiten como indispensablemente necesaria la máxima de que nada existe en vano en estas creaciones, y le conceden un valor igual al de este principio de la física general, de que nada sucede por casualidad. Y, en efecto, ellos no pueden rechazar este principio teleológico con más motivo que el principio universal de la física; porque del mismo modo que en la ausencia de este último no habría experiencia posible en general, así también sin el primero, no ha-

¹³ Para un antecedente de esta definición véase *Sobre el uso de principios teleológicos en la filosofía*, 8: 81. Para versiones posteriores de la misma véanse ciertos pasajes en el *Opus postumum*; por ejemplo: "La definición de un cuerpo orgánico es que es un cuerpo, cada parte del cual *está allí en aras de otra* (de forma recíproca, al mismo tiempo como fin y como medio). Es fácilmente apreciable que es ésta una mera idea, cuya existencia no posee una realidad *a priori* (es decir, que tal cosa pueda existir)": I. Kant, *Opus postumum*, edición de E. Förster, trad. de E. Förster y M. Rosen, Cambridge University Press, Cambridge, 1995, p. 64; véanse también las páginas 100 y 146. [Versión en español: *Transición de los principios metafísicos de la ciencia natural a la física (Opus postumum)*, edición de F. Duque, Anthropos-Ediciones de la Universidad Autónoma de Madrid, Barcelona, 1991.]

bría guía para la observación de una especie de cosas de la naturaleza que hemos concebido una vez teleológicamente bajo el concepto de fines de la misma.

En efecto, este concepto introduce la razón en un orden distinto de cosas que el del puro mecanismo de la naturaleza, que no puede aquí satisfacernos. Es necesario que una idea sirva de principio a la posibilidad de la producción de la naturaleza. Mas como una idea es una unidad absoluta de representación, mientras que la materia es una pluralidad de cosas que por sí misma no puede suministrar ninguna unidad determinada de composición, si esta unidad de la idea debe servir como principio *a priori* para determinar una ley natural para la producción de la forma de este género, es necesario que el fin de la naturaleza se extienda a todo lo que se halle contenido en su producción. En efecto, desde que para explicar un cierto efecto buscamos por cima del ciego mecanismo de la naturaleza un principio suprasensible y lo referimos a aquél en general, debemos juzgarlo en absoluto conforme a este principio y no hay razón para mirar la forma de esta cosa como dependiente todavía en parte del otro principio, porque entonces, en la mezcla de principios heterogéneos, no habría regla segura para el juicio.

Se puede, sin duda, concebir, por ejemplo, en el cuerpo del animal, ciertas partes como concreciones formadas según leyes puramente mecánicas (como la piel, los huesos, los cabellos). Mas es necesario siempre juzgar teleológicamente la causa que suministra la materia necesaria, que la modifica así y la deja en los sitios convenientes, es decir, que todo en este cuerpo debe considerarse como organizado, y que todo también, en cierta relación con la misma cosa, es órgano a su vez.

DEL PRINCIPIO DEL JUICIO TELEOLÓGICO SOBRE LA NATURALEZA, CONSIDERADA EN GENERAL COMO UN SISTEMA DE FINES

Hemos dicho anteriormente que la finalidad exterior de las cosas de la naturaleza no nos autorizaba para mirarlas como fines de la naturaleza, para explicar por esto su existencia, y que no se debían tomar los efectos que hallamos accidentalmente conforme a los fines por aplicaciones reales del principio de las causas finales. Así, porque los ríos faciliten el comercio de los pueblos en el interior de las tierras; porque las montañas contengan fuentes que formen estos ríos, y provisiones de nieve que los alimenten en el tiempo en que no hay lluvia; porque los terrenos estén inclinados de tal modo que conduzcan las aguas sin inundar el país, no se pueden tomar estas cosas, sin embargo, por fines de la naturaleza, porque

aunque esta forma de la superficie de la tierra sea muy necesaria para la producción y conservación del reino vegetal y del reino animal, no tiene, sin embargo, nada en sí cuya posibilidad nos obligue a admitir una causalidad determinada por fines. Esto se aplica también a las plantas que el hombre emplea para su necesidad o su placer, a los animales, como el camello, el buey, el caballo, el perro, etc., de los que el hombre hace uso de las diversas maneras, sea para su alimento, sea para sus servicios, y de los que en su mayor parte no puede prescindir. En las cosas que no tenemos razón para considerar por sí mismas como fines, no se puede atribuir una finalidad a su relación exterior más que de una manera hipotética.

Hay una gran diferencia entre juzgar una cosa, por razón de su forma interior, como un fin de la naturaleza, y tomar por un fin de la naturaleza la existencia de esta cosa. En este último caso no tenemos solamente necesidad del concepto de un fin posible, sino del conocimiento del objeto final (*scopus*) de la naturaleza, el cual implica una relación de la naturaleza con algo suprasensible, que excede en mucho todo nuestro conocimiento teleológico de la naturaleza, porque el objeto de la existencia de esta misma debe buscarse fuera de ella. La forma interior de un simple tallo de yerba prueba suficientemente para nuestra humana facultad de juzgar, que no ha podido producirse más que conforme a la regla de los fines. Pero si se le descarta de esto, si no se ve más que el uso que hacen de él otros seres de la naturaleza, y si abandonando de este modo la consideración de la organización interior no se considera más que las relaciones exteriores de finalidad, como la necesidad de las yerbas para las bestias, la de las bestias para el hombre, y no se ve por qué es necesario que haya hombres (cuestión que, principalmente cuando se piensa en los neoholandeses o en los fueguinos,¹⁴ no sería fácil de resolver), no se llega entonces a un fin categórico, sino toda esta relación de finalidad descansa sobre una condición que siempre se aleja y que en tanto incondicional (existencia de una cosa como objeto final) descansa por completo fuera de la consideración físico-teleológica del mundo. Pero entonces tal cosa no es un fin de la naturaleza, porque no se la puede considerar (o considerar su especie) como una producción de aquélla.

No, hay, pues, más que la materia organizada que implique necesariamente el concepto de un fin de la naturaleza, puesto que esta forma específica es al mismo tiempo una producción de ella. Por lo que este concepto conduce necesariamente

¹⁴ En el siglo XVIII se llamaba "Nueva Holanda" a Australia, antes de que ésta fuera colonizada por los ingleses, de modo que "neoholandeses", como dice Kant, se refiere a los aborígenes de Australia, y "fueguinos" a los aborígenes de Tierra del Fuego, Argentina.

a concebir el conjunto de la naturaleza, como un sistema fundado sobre la regla de los fines; y se debe subordinar a esta idea, conforme a los principios de la razón, todo el mecanismo de la naturaleza (al menos para servirse de él como de un medio en el estudio de los fenómenos).¹⁵ Todo en el mundo es bueno para algo, nada existe en vano; es por esto un principio de la razón que no existe en ella más que subjetivamente, es decir, como una máxima, y el ejemplo que la naturaleza nos da en sus producciones organizadas nos autoriza y aun nos invita a no esperar nada de ella y de sus leyes que no sea en general conforme a fines.

Se comprende que esto no es allí un principio para el juicio determinante, sino para el juicio reflexivo, que es regulador y no constitutivo, y que no nos da más que una dirección que conduce a considerar las cosas de la naturaleza, en su relación con un principio ya dado, conforme a un nuevo orden de leyes, y la ciencia de la naturaleza conforme a otro principio, a saber, el principio de las causas finales sin perjuicio, no obstante, del propio del mecanismo de su causalidad. Además, no se decide en manera alguna por esto, si una cosa que juzgamos conforme a este principio es realmente un fin en la intención de la naturaleza, si la yerba existe para el buey o las cabras, o si estos animales y las otras cosas de la naturaleza existen para los hombres. Es bueno también considerar por este lado las cosas que nos son desagradables y aun contrarias bajo ciertos respectos. Así, por ejemplo, se podría decir que los insectos que infestan nuestros vestidos, nuestros cabellos y nuestra cama, son, conforme a una sabia disposición de la naturaleza, un estímulo para la limpieza, que es ya por sí misma una condición importante para la conservación de la salud. Así todavía se dirá que los mosquitos y otros insectos que pican, en tanto que incomodan a los salvajes en los desiertos de América, son otros tantos estímulos que incitan a los hombres sin experiencia a separarse de los pantanos, a aclarar los bosques espesos que impiden el paso del aire, y volver con esto, como con la cultura del suelo, su morada más sana. Las mismas cosas que parecen contrarias al hombre en su organización interior, consideradas de esta manera, nos descubren una vista agradable y algunas veces también instructiva sobre una organización teleológica, que sin tal principio no nos

¹⁵ Aquí Kant expone su argumento central de que una vez que hayamos sido conducidos a introducir la idea de la sistematización intencionada por nuestra experiencia de los organismos, es natural que intentemos saber si no se podría también ver la naturaleza en conjunto como un sistema intencionado. Esta idea tiene un antecedente en *La crítica de la razón pura*, A 691/B 719. En *Sobre el uso de principios teleológicos en la filosofía*, Kant alega que la idea de un propósito respecto a la totalidad de la naturaleza, que él introduce con la analogía entre los seres organizados y la producción artística humana, tiene que estar “empíricamente condicionada” por lo que de hecho observamos en la naturaleza (8: 182). Esta restricción es parte de lo que se expresa en la presente obra al describir el principio de la intencionalidad de la naturaleza como un principio regulador, más que constitutivo.

hubiera hecho sospechar un estudio puramente físico de la naturaleza. Del mismo modo que, según algunos, la lombriz solitaria se ha concedido al hombre o al animal en que se encuentra para remediar cierto defecto de sus órganos vitales, yo preguntaría a mi vez, si los sueños (que acompañan siempre al sueño, aunque no se recuerda de ellos más que rara vez) no serán también efecto de una sabia disposición de la naturaleza. ¿No sirven, en efecto, en la relajación de todas las fuerzas motrices, para mover interiormente los órganos de la vida por medio de la imaginación, a la que dan una gran actividad (que en este estado se eleva casi siempre hasta la afección)?¹⁶ Y la imaginación en el sueño, ¿no muestra ordinariamente tanta más vivacidad cuanto es más necesario su movimiento, como por ejemplo, cuando el estómago está demasiado cargado? Por consiguiente, sin esta fuerza que nos mueve interiormente y sin esta inquietud fatigosa, de que acusamos a los sueños (que sin embargo, son en realidad remedios), el sueño, aun en el estado de salud, ¿no sería una completa extinción de la vida?¹⁷

La belleza misma de la naturaleza, es decir, su acuerdo con el libre juego de nuestras facultades de conocer en la aprehensión y el juicio de su apariencia, puede tomarse también por una finalidad objetiva de la naturaleza, considerada en su conjunto como un sistema del cual el hombre es un miembro, desde que el juicio teleológico que formamos de él, merced a los fines que en él nos descubren y que nos suministran los seres organizados, nos ha autorizado a elevarnos a la idea de un gran sistema de los fines de la naturaleza. Podemos mirar como un favor¹⁸ de la naturaleza el no haberse limitado a lo útil, sino haber extendido la belleza y los atractivos con tanta profusión y amarla por esto del mismo modo que la consideramos con respeto por su inmensidad, y nos sentimos ennoblecidos

¹⁶ En la *Anthropologie in pragmatischer Hinsicht* [*Antropología en sentido pragmático*] Kant define el afecto o emoción así: “es el sentimiento de un placer o desplacer en el estado presente que no permite se abra paso en el sujeto la *reflexión* (la representación racional de si debe entregarse o resistirse a él), la *emoción*” (§ 73, 7: 251). [Tomado de I. Kant, *Antropología en sentido pragmático*, trad. de J. Gaos, Alianza, Madrid, 1991. (E.)] En otras palabras, un afecto es un estado emocional que pone en riesgo la capacidad de la razón para controlar nuestra propia conducta.

¹⁷ Kant con frecuencia discutió la naturaleza de los sueños. Véanse las notas hechas por sus alumnos: *Anthropologie Collins*, 25: 101-102; *Anthropologie Friedländer*, 25: 1283-1288; *Anthropologie Menschenkunde*, 25: 995-997; *Anthropologie Mrongovius*, 25: 1283-1288; además de la *Antropología en sentido pragmático*, § 37, 7: 189-190.

¹⁸ En la parte estética se dijo que miraríamos favorablemente a la naturaleza en la medida que deriváramos de su forma una satisfacción totalmente libre (desinteresada). Pues en este mero juicio de la satisfacción no se considera la finalidad para la cual existen estas bellezas naturales, ya sea para incitar el placer en nosotros o sin que tenga cualquier relación con nosotros como fines. Sin embargo, en un juicio teleológico no nos concierne esta relación, y así podemos ver como un favor de la naturaleza el que mediante la exhibición de tantas formas bellas pueda promover la cultura [Kant].

por esta consideración, precisamente como si la naturaleza hubiera establecido y adornado en este objeto su magnífico teatro.

No queremos decir otra cosa en este párrafo sino que, desde que hemos descubierto en la naturaleza un poder de formar producciones que no podíamos concebir más que por medio del concepto de las causas finales, vamos más lejos y nos referimos además a un sistema de fines los objetos que (por sí mismo o por su concierto con otros seres) no exigen para explicar su posibilidad, sino que vengamos a buscar otro principio más allá de las causas ciegas. Porque la primera idea nos conduce ya por principio más allá del mundo sensible, puesto que la unidad del principio suprasensible no debe considerarse, como aplicándose de esta manera solamente a cierta especie de seres de la naturaleza, sino al mismo conjunto de la naturaleza en tanto que sistema.

DEL PRINCIPIO DE LA TELEOLOGÍA COMO PRINCIPIO INTERNO DE LA CIENCIA DE LA NATURALEZA

Los principios de una ciencia o son inherentes a ella (principios domésticos) o bien, estando fundados sobre conceptos que no pueden tener lugar más que fuera de la misma, son extraños (*peregrina*). Las ciencias que contienen esta última especie de principios, toman por fundamento de sus doctrinas lemas (*lemmata*), es decir, que reciben de otra ciencia cualquier concepto, y por éste el principio de toda su organización.¹⁹

Cada ciencia es por sí misma un sistema, y no basta formarla conforme a principios, y por consiguiente, proceder en ella técnicamente; es necesario tratarla de una manera arquitectónica, es decir, como un edificio existente por sí mismo, como algo formando por sí un todo, y no como una parte de otro edificio, aun cuando después se pueda abrir paso de esta ciencia a otra y recíprocamente.

Si, pues, se introduce en la ciencia de la naturaleza el concepto de Dios, para explicarse la finalidad en la naturaleza, y después nos servimos de esta finalidad para probar que hay Dios, cada una de estas dos ciencias pierde su consistencia, y las dos vienen a ser inciertas por haber confundido sus límites.

La expresión de fin de la naturaleza previene ya suficientemente esta confusión, para impedirnos mezclar la ciencia de la naturaleza y la ocasión que nos da esta ciencia de juzgar teleológicamente los objetos de la misma, con la contem-

¹⁹ Compárese todo este apartado con la discusión de Kant sobre las "Reglas de un método revisado de físico-teología" en *El único argumento posible...*, 2: 126-127.

plación de Dios, y por consiguiente, con una deducción teológica. Se debe, pues, mirar como cosa insignificante el sustituir a esta expresión la de fin divino o de objeto providencial, como conviniendo mejor a un alma piadosa, y por esta razón se deberá siempre venir en definitiva a derivar de un sabio autor del mundo estas formas finales que hallamos en la naturaleza. Es necesario, por el contrario, tener el cuidado y la modestia de limitarse a la expresión que no designe más que lo que sabemos, es decir, a la expresión de fin de la naturaleza. En efecto, antes de inquirir acerca de la causa de la naturaleza misma, hallamos en ella y en el curso de su desenvolvimiento producciones de este género que la misma forma, según leyes conocidas de la experiencia, y conforme a las cuales la ciencia de la naturaleza debe juzgar estas cosas, y por consiguiente, también buscar la causalidad de ellas en la naturaleza misma, considerándola sometida a la regla de los fines. Ella no debe, pues, salir de sus límites para introducir en sí misma, como un principio que le sea propio, un concepto cuya confirmación no podemos hallar jamás en la experiencia, y que no hay necesidad de aventurar más que cuando la ciencia de la naturaleza se ha perfeccionado.

Las cualidades de la naturaleza que se demuestran *a priori*, y cuya posibilidad, por consiguiente, puede deducirse de principios *a priori*, sin el auxilio de la experiencia, contienen ciertamente una finalidad técnica; mas como son absolutamente necesarias, no podemos referirlas a la tecnología de la naturaleza, o al método que es particular de la física, en el estudio de las cuestiones que suscita la naturaleza. Sus relaciones aritméticas o geométricas, así como las leyes generales del movimiento, no pueden ser en física legítimos principios de explicación teleológica, por más extraña y asombrosa que pueda parecer la unión de diversas reglas, completamente independientes en apariencia las unas de las otras, en un solo principio; y si en la teoría general de la finalidad de las cosas de la naturaleza merecen tomarse en consideración, es allí una consideración venida de fuera, perteneciente a la metafísica, y no constituyendo un principio inherente a la ciencia de la naturaleza. Mas ya que se trata de las leyes empíricas, de los fines de la naturaleza en los seres organizados, es no solamente permitido sino inevitable buscar en un juicio teleológico el principio de la ciencia de la naturaleza, considerada en esta clase particular de objetos.

Y sin embargo, conforme a lo que hemos dicho hace poco, si la física quiere encerrarse exactamente en sus límites es necesario que haga enteramente abstracción de la cuestión de saber si los fines de la naturaleza son o no intencionales; porque esto sería mezclarse en una cuestión extraña (es decir, en una cuestión metafísica). Basta que haya objetos que no se puedan explicar y cuya forma

interior no se puede conocer más que por medio de las leyes de la naturaleza que nosotros no podemos concebir más que tomando la idea de fin por principio. Con el fin de que no se incurra en la sospecha de que pretendemos mezclar la menor cosa del mundo a nuestros principios de conocimiento, alguna cosa que no pertenezca a la física, como una causa sobrenatural, hablando de la naturaleza, en la teleología, como si la finalidad en ella fuera intencional, se habla de ésta como si se atribuyera esta intención a la naturaleza, es decir, a la materia. Por donde se quiere mostrar con esto (porque después de lo dicho, no puede haber mala inteligencia, puesto que es imposible en sí atribuir intención en el sentido propio de la palabra, a una materia inanimada) que esta palabra no expresa aquí más que un principio del juicio reflexivo, y no del juicio determinante, y que por consiguiente no designa un principio particular de causalidad aun cuando añada al uso de la razón otra especie de investigación que la que se funda sobre las leyes mecánicas, a fin de suplir la insuficiencia de esas leyes en la investigación empírica de todas las leyes particulares de la naturaleza. Se habla, pues, con razón en la teleología en tanto que se refiere a la física, de la prudencia, la economía, la previsión, la beneficencia de la naturaleza, sin hacer por esto un ser inteligente (lo que sería absurdo), sino también sin aventurarse a colocar sobre ella, como el autor de la naturaleza, otro ser inteligente, porque esto sería temerario.²⁰ No se hace más que designar una especie de causalidad de la naturaleza, que concebimos por analogía con nuestra propia causalidad en el uso técnico de la razón, y colocar ante los ojos la regla, conforme a la cual debemos estudiar ciertas producciones de la naturaleza.

¿Mas por qué la teleología no constituye ordinariamente una parte especial de la ciencia teórica de la naturaleza y no es mirada como una propedéutica o un paso a la teología? Es con el fin de mantener firmemente el estudio de la naturaleza mecánica en la esfera de nuestra observación y de nuestras experiencias, de tal suerte que no podamos nosotros mismos producir de una manera semejante a la naturaleza, o a semejanza de sus leyes. Porque no se ve perfectamente una cosa, más que en tanto que se puede hacer por sí, y realizarla conforme a conceptos. Pero la organización como fin interior de la naturaleza excede infinitamente todo poder que intente producir por medio del arte semejante exhibición; y en cuanto

²⁰ El adjetivo alemán *vermessen* (“temerario”; literalmente, “desmedido”) es una buena y significativa palabra. Un juicio en que olvidamos medir apropiadamente nuestro poder (de entendimiento) puede parecer muy modesto y sin embargo ser muy presuntuoso y temerario. Son de este tipo la mayoría de los juicios mediante los cuales pretendemos exaltar la sabiduría divina, ya que en ellos les atribuimos intenciones a las obras de la creación y la preservación cuya verdadera intención es honrar nuestra propia sabiduría en cuanto pensadores sutiles.

a estas disposiciones de la naturaleza, a las cuales se ha atribuido finalidad (por ejemplo, los vientos, la lluvia, etc.), la física considera de ellos muy bien el mecanicismo, mas no puede mostrar su relación con los fines y tener en esto una condición que pertenezca necesariamente a la causa, porque la necesidad de la conexión que aquí hallamos no designa más que el enlace de nuestros conceptos y no la naturaleza de las cosas.

¿QUÉ ES UNA ANTINOMIA DEL JUICIO?

El juicio determinante no tiene por sí mismo principios que funden los conceptos de los objetos. No es autónomo porque no hace más que subsumir bajo leyes o conceptos dados como principios. He aquí precisamente por qué no está expuesto al peligro de hallar una antinomia en sí mismo y una contradicción en sus principios. Nosotros hemos visto, en efecto, que el juicio trascendental, que contiene las condiciones de toda subsunción bajo categorías, no es por sí mismo legislativo; se limita a indicar las condiciones de la intuición sensible, que permiten dar una realidad (una aplicación) a un concepto dado, como ley del entendimiento, y en esto no puede jamás caer en desacuerdo consigo mismo (al menos en cuanto a sus principios).²¹

Mas el juicio reflexivo debe subsumir bajo una ley que todavía no es dada, y que por consiguiente no es en realidad más que un principio de reflexión, sobre objetos, para los cuales carecemos por completo, objetivamente, de una ley o de un concepto propio para servir de principio en los casos dados. Por lo que, como no hay uso posible de las facultades de conocer sin principios, el juicio reflexivo en este caso se servirá a sí mismo de principio, y éste, no siendo objetivo y no pudiendo añadir nada al conocimiento del objeto, no podrá ser más que un principio subjetivo, sirviéndonos para dirigir de una manera armoniosa nuestras facultades de conocer, es decir, para reflexionar sobre una clase de objetos. Así para esta especie de casos, el juicio reflexivo tiene sus máximas, y máximas necesarias que aplica al conocimiento de las leyes empíricas de la naturaleza, a fin de llegar con sus auxilios a los conceptos, y aun a conceptos de la razón, cuando absolutamente hay necesidad de ellos para aprender a conocer la naturaleza en sus leyes empíricas. Pero puede haber contradicción, por consiguiente, antinomia, entre estas máximas necesarias del juicio reflexivo. De aquí una dialéctica, que si cada

²¹ Aquí Kant alude a la explicación del juicio que dio en *La crítica de la razón pura*, A 131-235/ B 164-194.

una de las dos máximas contradictorias tiene su principio en la naturaleza de las facultades de conocer, puede llamarse natural, y considerarse como una ilusión inevitable, que la crítica debe descubrir y explicar con el fin de que no se extravíe.

EXPOSICIÓN DE ESTA ANTINOMIA

En tanto que la razón se aplica a la naturaleza, considerada como el conjunto de objetos de los sentidos exteriores, puede fundarse sobre leyes que en parte el entendimiento prescribe por sí mismo *a priori* a la naturaleza, y que en parte puede extender al infinito por medio de las determinaciones empíricas que presenta la experiencia. En la aplicación de la primera especie de leyes, a saber, de las leyes universales de la naturaleza material en general, el juicio no emplea ningún principio particular de reflexión, porque entonces es determinante, pues le es dado por el entendimiento un conocimiento empírico coherente fundado sobre un verdadero sistema de leyes naturales, y por consiguiente, la unidad de la naturaleza en sus leyes empíricas. Por lo que en esta unidad contingente de las leyes particulares, el juicio puede fundar su reflexión sobre dos máximas, de las que una es suministrada *a priori* por el entendimiento, pero la otra es ocasionada por experiencias particulares, que ponen en juego la razón y nos llevan a juzgar conforme a un principio particular la naturaleza corporal y sus leyes. Como se halla que estas dos máximas no parece que puedan marchar juntas, resulta una dialéctica que extravía el juicio en el principio de su reflexión.

La primera máxima del juicio es esta tesis: toda producción de las cosas materiales y de sus formas debe juzgarse posible conforme a leyes puramente mecánicas.

La segunda máxima es la antítesis: algunas producciones de la naturaleza material no se pueden juzgar posibles conforme a las leyes puramente mecánicas (el juicio que formamos exige otra ley de la causalidad, a saber, la de las causas finales).

Si se convirtiesen estos principios reguladores de la investigación de la naturaleza en principios constitutivos de la posibilidad de las cosas mismas, deberían enunciarse así:

Tesis: toda producción de cosas materiales es posible conforme a leyes mecánicas.

Antítesis: ciertas producciones naturales no son posibles conforme a leyes puramente mecánicas.

Bajo este último punto de vista, como principios objetivos para el juicio determinante, estas proposiciones se contradirían, y por consiguiente, una de las dos sería necesariamente falsa; habría entonces una antinomia, que no sería una antinomia del juicio, sino una contradicción en las leyes de la razón. Mas la razón no puede probar ni uno ni otro principio, porque no podemos tener *a priori* sobre la posibilidad de las cosas, en tanto que se hallan sometidas a leyes empíricas, ningún principio determinante.

En cuanto a la máxima del juicio reflexivo que acabamos de citar, no contiene en realidad contradicción. Porque cuando digo: yo debo juzgar posibles conforme a leyes puramente mecánicas todos los sucesos de la naturaleza material, por consiguiente, también todas las formas que son producciones de ella, yo no quiero que estas cosas no sean posibles más que de esta manera (con exclusión de toda especie de causalidad); yo solamente quiero indicar que debo siempre reflexionar sobre estas cosas según el principio del puro mecanismo de la naturaleza, y por consiguiente, estudiar este mecanismo tan profundamente como sea posible, pues que si de él no se hace el principio de sus investigaciones, no puede haber verdadero conocimiento de la naturaleza. Esto no impide emplear la segunda máxima, cuando la ocasión se presente, es decir, buscar para algunas formas de la naturaleza (y con ocasión de estas formas, en toda la naturaleza) un principio de reflexión enteramente diferente de la explicación por el mecanismo de la misma, a saber, el principio de las causas finales. En efecto, esta última máxima no obliga a la reflexión a abandonar la primera: se le ordena, por el contrario, perseguirla tan lejos como se pueda. No se quiere aun decir con esto que estas formas no serían posibles por el mecanismo de la naturaleza. Se afirma solamente que la razón humana, limitándose a este principio, podrá muy bien adquirir otros conocimientos de las leyes físicas, pero no llegará jamás a formarse la menor idea de lo que constituye específicamente un fin de la naturaleza; y se deja a un lado la cuestión de saber si el principio interior, para nosotros desconocido, de la naturaleza, el mecanismo físico y la finalidad, no pueden concertarse de manera que no formen más que uno. Solamente nuestra razón es incapaz de producir por sí misma este acuerdo; y por consiguiente, el juicio se ve obligado, como juicio reflexivo (por medio de un principio subjetivo), y no como juicio determinante (conforme a un principio de la posibilidad de las cosas en sí), a concebir, para explicar la posibilidad de ciertas formas de la naturaleza, otro principio que el del mecanismo de la naturaleza.

PREPARACIÓN PARA LA SOLUCIÓN
DE LA PRECEDENTE ANTINOMIA

No podemos demostrar la imposibilidad de la producción de los seres organizados por un simple mecanismo de la naturaleza porque no percibimos en su primer principio interno la infinita variedad de las leyes de la naturaleza, y por consiguiente, somos absolutamente incapaces de alcanzar el principio interno, y suficiente para todo, de la posibilidad de una naturaleza (el cual reside en lo suprasensible). Que no se pregunte, pues, si el poder productor de la naturaleza no basta para las cosas cuya forma o enlace juzgamos conforme a la idea de fines, así como en aquellas para las cuales creemos podernos contentar con un simple mecanismo, y si en realidad, las cosas que consideramos como verdaderos fines de la naturaleza (que debemos necesariamente juzgar así), tienen por principio una especie original de causalidad, enteramente particular, que no puede hallarse contenida en la naturaleza material o en su *substratum* inteligible, a saber, un entendimiento arquitectónico; porque éstas son las dos cuestiones sobre las cuales no podemos hallar ningún esclarecimiento en nuestra razón, que hayamos muy limitada al lado del concepto de causalidad, cuando se trata de especificarlo *a priori*. Mas lo que hay de cierto indudablemente es que a los ojos de nuestra facultad de conocer el simple mecanismo de la naturaleza no puede bastar para explicar la producción de seres organizados. Es, pues, un verdadero principio para el juicio reflexivo el concebir, para explicarse esta relación de las causas finales, que está tan manifiesta en ciertas cosas, una causalidad diferente del mecanismo, a saber, la de una causa del mundo que obra conforme a fines (inteligente), por temerario e indemostrable que sea este principio para el juicio determinante. Este principio no es, pues, más que una máxima del juicio, en la cual el concepto de esta causalidad es una pura idea, a la cual no se pretende en manera alguna atribuir la realidad, sino de la que nos servimos como de una guía para la reflexión, que queda siempre abierta a toda explicación mecánica, y no sale del mundo sensible; en el caso contrario, éste sería un principio objetivo que la razón prescribiría y al cual se sometería el juicio determinante, y en tal caso éste pasaría del mundo sensible al trascendente, quizá para perderse en él.

La apariencia de la antinomia entre las máximas de una explicación propiamente física (mecánica) y la explicación teleológica (técnica) descansa, pues, por completo, sobre la confusión de un principio del juicio reflexivo con un principio del juicio determinante, y de la autonomía del primero (que no tiene más que un

valor subjetivo, o que no tiene valor más que para el uso de nuestra razón relativamente a las leyes particulares de la experiencia) con la heteronomía del segundo, que debe regularse por leyes (generales o particulares) dadas por el entendimiento.

DE LOS DIVERSOS SISTEMAS SOBRE LA FINALIDAD DE LA NATURALEZA

Nadie ha puesto jamás en duda la verdad del principio de que se deberían juzgar ciertas cosas de la naturaleza (los seres organizados) y su posibilidad, conforme al concepto de las causas finales, en el momento mismo en que no quisiéramos más que una guía para aprender a conocer su manera de ser por la observación, sin elevarnos hasta la investigación de su primer origen. Toda la cuestión es, pues, saber si este principio no tiene más que un valor subjetivo, es decir, si no es más que una simple máxima de nuestro juicio, o si es un principio objetivo de la naturaleza, conforme al cual ésta contendría, además de su mecanismo (determinado por las solas leyes del movimiento), otra especie de causalidad, a saber, la de las causas finales, relativamente a las cuales estas leyes (de las fuerzas motrices) no serían más que causas intermedias.

Pero se podría dejar sin resolver este problema de la especulación, porque si nos contentamos con permanecer en los límites de un simple conocimiento de la naturaleza, estas máximas nos bastan para estudiarla y sondear sus secretos más ocultos, hasta donde lo permitan las fuerzas humanas. Hay, pues, un cierto presentimiento de nuestra razón, o como un aviso de la naturaleza, que nos indica que por medio del concepto de las causas finales podríamos elevarnos sobre la naturaleza, y referirla por sí misma al último punto de la serie de las causas, si abandonásemos la investigación de ella (aunque no fuéramos en esto muy fijos), o al menos la suspendiésemos por algún tiempo, para buscar primero a dónde nos conduce este principio extraño a la ciencia de la naturaleza, es decir el concepto de las causas finales.

Mas esta máxima indisputable omitiría entonces una cuestión que abre un vasto campo a las contestaciones; la cuestión de saber si la relación final en la naturaleza prueba una especie particular de finalidad en la naturaleza misma, o si considerada en sí misma y conforme a principios objetivos, no se confunde más bien con el mecanismo de la naturaleza, y no descansa sobre el mismo principio. Solamente en esta última suposición, como este principio está muchas veces demasiado oculto a nuestras investigaciones en ciertas producciones de la naturale-

za, ensayamos un principio subjetivo, el principio del arte, es decir, una causalidad determinada por ideas, y la atribuimos a la naturaleza por analogía. Pero si este procedimiento nos ha dado buen resultado en muchos casos, en algunos parece que no ha sido tan bueno, por consiguiente, en todos no nos autoriza a introducir en la ciencia de la naturaleza una especie de operación distinta de la causalidad que determinen las leyes puramente mecánicas de la naturaleza misma. Puesto que llamamos técnica la operación (la causalidad) de la naturaleza, a causa de esta apariencia de finalidad que hallamos en sus producciones, la dividiremos en técnica intencional (*technica intentionalis*) y técnica natural (*technica naturalis*). La primera significa que el poder productor de la naturaleza, conforme a las causas finales, debe ser tenido por una especie particular de esa causalidad; la segunda, que es en realidad enteramente idéntica al mecanismo de la naturaleza, y que el acuerdo contingente de la naturaleza con nuestros conceptos de arte y con sus reglas no debe mirarse más que como una condición subjetiva del juicio, y no puede tomarse legítimamente por un modo particular de producción de la naturaleza.

Si a pesar de esto hablamos de los sistemas que se han intentado para explicar la naturaleza relativamente a las causas finales, es necesario notar bien que todos estos sistemas disputan entre sí dogmáticamente, es decir, sobre principios objetivos de la posibilidad de las cosas, sea que admitan causas puramente naturales. No disputan sobre las máximas subjetivas por medio de las cuales juzgamos estas producciones en donde hallamos la finalidad. En este último caso se podría muy bien conciliar principios desemejantes, mientras que en el primero, principios contradictorios opuestos no pueden elevarse y subsistir juntos.

Los sistemas relativos a la técnica de la naturaleza, es decir, al poder productor, conforme a la regla de los fines, son de dos especies: representan el idealismo o el realismo de los fines de la naturaleza. El primero cree que toda finalidad de la naturaleza es natural; el segundo, que alguna finalidad (la de los seres organizados) es intencional; de donde se podría justamente sacar como hipótesis la consecuencia de que la técnica de la naturaleza, y aun la que concierne a todas sus demás producciones en su relación al conjunto de la misma, es intencional, es decir, es un fin.

1. El idealismo de la finalidad (entiendo siempre aquí la finalidad objetiva), admite, o bien la casualidad, o bien la fatalidad de las determinaciones de la naturaleza, de donde resulta la forma final de sus producciones. El primer principio concierne a la relación de la materia con la causa física de su forma, a saber, las leyes del movimiento; el segundo, a la relación de la materia con la causa super-

física de la materia misma y de toda la naturaleza. El sistema de la casualidad, que se atribuye a Epicuro²² o a Demócrito,²³ tomado a la letra, es tan evidentemente absurdo que no nos debe ocupar; al contrario, el sistema de la fatalidad (del cual se considera a Spinoza²⁴ como autor, aunque según toda apariencia sea mucho más antiguo), que invoca algo de suprasensible, a donde por consiguiente no puede alcanzar nuestra vista, no es tan fácil de refutar, precisamente porque su concepto del ser primero no puede comprenderse. Mas lo que hay de cierto es que en este sistema la relación de los fines del mundo no puede considerarse como intencional (puesto que si deriva de un ser primero, no es de su entendimiento, y por consiguiente, de un designio de este ser, sino de la necesidad de su naturaleza y de la unidad del mundo que de él emana), y que, por consiguiente, el fatalismo de la finalidad es al mismo tiempo un idealismo.

2. El realismo de la finalidad de la naturaleza: es físico o superfísico. El primero funda los fines que halla en la naturaleza, sobre un poder natural, análogo a una facultad que obra conforme a un objeto, la vida de la materia (perteneciente a la materia misma, o que deriva de un principio interior viviente, de un alma del mundo), y se llama el hiloísmo.²⁵ El segundo las deriva de la causa primera

²² Véase la *Carta a Herodoto*: “Y en verdad no es preciso considerar que, en los [fenómenos] celestes, el desplazamiento, la revolución, el eclipse, el orto, el ocaso y las cosas correspondientes a éstas se generaron bajo el mandato de alguien que [lo] ordene o [lo] haya ordenado [...] ni tampoco [es preciso considerar que tales objetos celestes], que no [son sino] fuego concentrado, puedan al mismo tiempo poseer la dicha [y] controlar tales movimientos a voluntad [...]” [Tomado de Sebastián Caro y Trinidad Silva, “Epicuro: *Epístola a Herodoto*. Introducción, traducción y notas”, *Onomázein*, 17 (1): 135-170, 2008, en específico §§ 76 y 77. (T.)]

²³ Demócrito de Abdera vivió entre los años 460 y 370 a. C. Aunque se registran en las fuentes antiguas muchos títulos de sus obras sobre la naturaleza y las causas, ninguno de los fragmentos que han sobrevivido de hecho exponen lo que Kant aquí denomina el sistema de causalidad (véase K. Freeman, *Ancilla to the Pre-Socratic Philosophers*, Harvard University Press, Cambridge, 1966, pp. 91-120). Aristóteles dice que “si atendemos a los antiguos, podría parecer que el objeto de la física es la materia (pues Empédocles y Demócrito se han ocupado escasamente de la forma y de la esencia)” (*Física*, II, 194a, 18-20). [Tomado de Aristóteles, *Física*, introd., trad. y notas de G. R. de Echandía, Gredos, Madrid, 1995. (T.)]

²⁴ Kant acaso pensaba en ciertas afirmaciones de la *Ética* de Spinoza, como la siguiente: “Mostraré más abajo que a la naturaleza de Dios no le pertenece ni el entendimiento ni la voluntad. Sé, por cierto, que hay muchos que piensan poder demostrar que a la naturaleza de Dios pertenecen un entendimiento supremo y una voluntad libre; en efecto, dicen que no conocen nada más perfecto, para poder atribuirlo a Dios, que aquello que en nosotros es suma perfección” (*Ética demostrada según el orden geométrico*, trad. de Ó. Cohen, FCE, México, 1958, p. 27, proposición XVII, escolio), o “*Las cosas no han podido ser producidas por Dios de ningún otro modo ni de ningún otro orden, que como han sido producidas*. En efecto, todas las cosas, dada la naturaleza de Dios, se han seguido necesariamente (por la proposición XVI), y por la necesidad de la naturaleza de Dios están determinadas a existir y obrar de un cierto modo” (*ibid.*, p. 39, proposición XXXIII).

²⁵ Para más comentarios sobre el hiloísmo véase su obra de 1766, *Träume eines Geistersehers, erläutert durch Träume der Metaphysik* [Los sueños de un visionario explicados por los sueños de la metafísica], 2: 330, y *Principios metafísicos de la ciencia de la naturaleza*, 4: 544.

del universo, como de un ser inteligente (originariamente vivo, obrando con intención, y es el teísmo).²⁶

NINGUNO DE LOS SISTEMAS PRECEDENTES DA LO QUE PROMETE

¿Qué quieren todos estos sistemas? Ellos pretenden explicar nuestros juicios teleológicos sobre la naturaleza, y se toman en tal sentido que los unos niegan la verdad de estos juicios, y los resuelven, por consiguiente, en un idealismo de la naturaleza, y los otros los reconocen como verdaderos y prometen demostrar la posibilidad de una naturaleza conforme a la idea de las causas finales.

1. Entre los sistemas que defienden el idealismo de las causas finales en la naturaleza, los unos admiten en su principio una causalidad determinada por las leyes del movimiento (por las cuales existen las cosas de la naturaleza, donde llamamos la finalidad); mas rehúsan a esta causalidad la intencionalidad, es decir, niegan que aquélla se determine con intención a la producción de esta finalidad, o en otros términos, que la causa sea un fin. Tal es la explicación de Epicuro; en esta explicación, la técnica de la naturaleza no se distingue mucho del puro mecanismo; la ciega casualidad sirve para explicar no solamente el acuerdo de las producciones de la naturaleza con nuestros conceptos de fin, por consiguiente, la técnica, sino incluso la determinación de las causas de estas producciones por las leyes del movimiento, por consiguiente, su mecanismo. Es decir, que nada hay que no esté explicado, ni aun la apariencia que es necesario al menos reconocer en nuestro juicio teleológico, y que así el pretendido idealismo de este juicio no es de modo alguno probado.

De otro lado Spinoza quiere dispensarnos de toda investigación sobre el principio de la posibilidad de los fines de la naturaleza, y quitar a esta idea toda reali-

²⁶ Se puede ver a partir de esto que en la mayoría de las especulaciones sobre la razón pura las escuelas filosóficas usualmente han intentado todas las soluciones posibles para cierta cuestión que concierne a las aserciones dogmáticas. Así, en aras de la intencionalidad de la naturaleza se ha propuesto tanto la materia no viviente o un Dios no viviente, como la materia viviente o un Dios viviente. A nosotros no nos queda nada que hacer, excepto, si fuera necesario, desechar todas estas aserciones objetivas y sopesar nuestro juicio críticamente, meramente en relación con nuestra facultad cognoscitiva, a fin de proporcionar su principio con la validez no dogmática pero adecuada de una máxima, con el propósito de una utilización confiable de la razón [Kant].

dad, mirándolos en general, no como producciones, sino como accidentes inherentes a un ser primero, y atribuyendo a este ser, concebido como sustancia de las cosas de la naturaleza, no la causalidad por relación a estas cosas, sino solamente la sustancialidad, y (por la necesidad incondicional de este ser, así como de todas las cosas de la naturaleza, en tanto que accidentes inherentes a este ser) asegura ciertamente a las formas de la naturaleza, la unidad de principio necesaria a toda finalidad, pero al mismo tiempo les quita la contingencia, sin la cual no se puede concebir ninguna unidad de fines, y por esto descarta toda intencionalidad, lo mismo que rehúsa todo entendimiento al principio de las cosas de la naturaleza. Mas el spinozismo no da lo que promete. Quiere dar una explicación del enlace de los fines (que no niega) en las cosas de la naturaleza, y no invoca más que la unidad del sujeto, al cual son inherentes. Pero aun cuando se concediera que los seres del mundo existen de esta manera, esta unidad ontológica no sería por esto una unidad de fines, y no nos la haría comprender en manera alguna. Esta última es, en efecto, una especie de unidad, completamente particular, que no resulta del enlace de las cosas (de los seres del mundo) en una sola sustancia (el Ser supremo), sino que implica una relación con una causa inteligente, de suerte que, aunque se uniesen todas estas cosas en una sustancia simple, no se tendría por esto una relación final, a menos de concebir primero estas cosas como efectos interiores de esta sustancia, en tanto que causa, y después esta causa misma como una causa inteligente. Sin estas condiciones formales, toda unidad no es más que una simple necesidad natural; y atribuida a las cosas que nos representamos como interiores las unas a las otras, una ciega necesidad. Que si se quiere llamar finalidad de la naturaleza esta perfección trascendental de las cosas (consideradas en su esencia propia) de la que habla la escuela, y por la cual se designa que cada cosa tiene en sí misma todo lo que le es necesario para ser tal cosa, y no para ser otra, es tomar puerilmente palabras por ideas. Porque si es necesario concebir todas las cosas como fines, y si por consiguiente, ser una cosa y ser fin son idénticos, no hay nada en realidad que merezca particularmente ser representado como un fin.

Se ve por esto que Spinoza, reduciendo nuestros conceptos de la finalidad de la naturaleza a la conciencia que tenemos de existir en un ser que lo comprende todo (y que al mismo tiempo es simple) y buscando esta forma únicamente en la unidad de la naturaleza, no podía soñar en sostener el realismo, sino simplemente el idealismo de la finalidad de la naturaleza, y que además aún no podía establecer este último sistema, puesto que la simple representación de la unidad de sustancia no puede producir la idea de una finalidad, ni aun intencional.

2. Los que sostienen, no solamente el realismo de los fines de la naturaleza, sino que piensan también poder explicarlo, se creen capaces de descubrir al menos la posibilidad de una especie particular de causalidad, a saber, la de las causas intencionales; de lo contrario, no intentarían esta explicación. En efecto, la hipótesis más atrevida quiere al menos que la posibilidad de lo que se admite como principio sea cierta, y que se pueda asegurar al concepto de este principio su realidad objetiva.

Mas la posibilidad de una materia viviente (cuyo concepto encierra una contradicción, puesto que la inercia —*inertia*— es el carácter esencial de la materia) no se puede concebir;²⁷ la de una materia animada y de toda la naturaleza, concebida como un animal, no podría ser cuando más admitida (en favor de la hipótesis de una finalidad, en el conjunto de la naturaleza), más que como si la experiencia nos la mostrase en pequeño en su organización, porque no se puede percibirla *a priori*. La explicación cae, pues, en un círculo vicioso, si se quiere derivar la finalidad de la naturaleza en los seres organizados, y por consiguiente, sin una experiencia de esta especie, no nos podemos formar ninguna idea de la posibilidad de esta vida. El hilozoísmo no tiene, pues, lo que promete.

Por último, el teísmo no puede establecer mejor dogmáticamente la posibilidad de los fines de la naturaleza como una clave para la teleología, aunque tiene sobre todas las otras explicaciones la ventaja de arrancar al idealismo la finalidad de la naturaleza, atribuyendo un entendimiento al Ser supremo, o invocando una causalidad intencional para explicar la producción de esta finalidad.

En efecto, se debería primero probar de una manera suficiente para el juicio determinante, que la unidad de fines en la materia no puede ser producida por el simple mecanismo de la materia misma, para estar autorizado a colocar en ella el principio de una manera determinada fuera de la naturaleza. Mas todo lo que podemos avanzar es, que conforme a la naturaleza y los límites de nuestras facultades de conocer (puesto que no percibimos el primer principio interior de este mecanismo), no debemos buscar en la materia un principio de relaciones finales determinadas, y que no hay para nosotros otra manera de juzgar la producción de sus efectos, como fines de la naturaleza, que explicarlos por una inteligencia suprema, concebida como causa del mundo. Mas esto es un principio para el juicio reflexivo, no para el juicio determinante, y no puede autorizar ninguna afirmación objetiva.

²⁷ Véanse las notas hechas por sus alumnos en *Metaphysik L*, 28: 275.

LA IMPOSIBILIDAD DE TRATAR DOGMÁTICAMENTE EL CONCEPTO
DE UNA TÉCNICA DE LA NATURALEZA VIENE DE LA IMPOSIBILIDAD
MISMA DE EXPLICAR UN FIN DE LA NATURALEZA

Se trata un concepto dogmáticamente (aun cuando esté sometido a condiciones empíricas) cuando se le considera contenido bajo otro concepto del objeto, constituyendo un principio de la razón, y cuando se le determina conforme a este concepto. Se trata críticamente, cuando no se le considera más que relativamente a nuestra facultad de conocer, por consiguiente, las condiciones subjetivas, que nos lo hacen concebir sin pretender decidir nada sobre su objeto. El método dogmático es, pues, el que conviene al juicio determinante, y el método crítico el que conviene al juicio reflexivo.

El concepto de una cosa, en tanto que fin de la naturaleza, subsume la naturaleza bajo una causalidad que no es concebible más que por medio de la razón, a fin de hacernos juzgar, conforme a este principio, lo que es dado del objeto en la experiencia. Mas para aplicar dogmáticamente este concepto al juicio determinante, se necesitaría que estuviésemos seguros primero de su realidad objetiva, puesto que sin esto no podríamos subsumir en él ninguna cosa de la naturaleza. Luego este concepto está sin duda sometido a condiciones empíricas, es decir, que no es posible más que bajo ciertas condiciones dadas en la experiencia; mas no se puede aislar y no es posible más que por medio de un principio de la razón aplicada al juicio del objeto. Siendo esto así, no podemos percibir ni establecer dogmáticamente la realidad objetiva (es decir, mostrar que un objeto es posible conforme a este concepto), y no sabemos si es simplemente un concepto ratiocinante, objetivamente vacío (*conceptus ratiocinans*), o un concepto ratiocinado, fundando un conocimiento y confirmado por la razón (*conceptus ratiocinatus*). No se puede, pues, tratarlo dogmáticamente, y referirlo al juicio determinante, es decir, que no solamente es imposible decidir si la producción de las cosas de la naturaleza, consideradas como fines de la misma, exige o no una causalidad de una especie particular (la causalidad intencional) sino que ni aun puede ponerse la cuestión, puesto que el concepto de un fin de la naturaleza no es un concepto, cuya realidad objetiva sea demostrable por la razón (es decir, que éste no es un concepto constitutivo para el juicio determinante, sino solamente un concepto regulador para el juicio reflexivo).

El carácter que le atribuimos aquí resulta de que como concepto de una producción de la naturaleza implica a la vez para el mismo objeto considerado como

fin, la necesidad de aquélla y la contingencia de la forma de este objeto (relativamente a las simples leyes de la naturaleza), y de lo que, por consiguiente, si no hay en esto contradicción, debe suministrar un principio de la posibilidad de esta naturaleza misma y de su relación con algo (suprasensible) que no alcanza la experiencia, y por consiguiente, con nuestro conocimiento, a fin de que podamos juzgarle conforme a una especie de causalidad diferente de la del mecanismo de la naturaleza, cuando queremos considerar su posibilidad. Es porque como el concepto de una cosa, en tanto que fin de la naturaleza, es trascendental para el juicio determinante, cuando se considera el objeto por la razón (aunque pueda ser inmanente para el juicio reflexivo en su aplicación a los objetos de la experiencia), y como, por consiguiente, no se le puede atribuir esta realidad objetiva, que es el carácter de los juicios determinantes, se comprende de qué modo, cuando se trata dogmáticamente el concepto de los fines de la naturaleza y el de la naturaleza misma, considerada como un conjunto de causas finales, todos los sistemas objetivos posibles no pueden decidir nada ni afirmativa ni negativamente. En efecto, cuando se subsumen ciertas cosas bajo un concepto que es simplemente problemático, los predicados sintéticos de este concepto (aquí, por ejemplo, la cuestión de saber, si el fin de la naturaleza que concebimos para explicar la producción de las cosas es o no intencional), debe también suministrar juicios problemáticos que les dé una forma afirmativa o una forma negativa, porque no se sabe si se juzga sobre algo o sobre nada. El concepto de una causalidad determinada por fines (de una técnica de la naturaleza), tiene sin duda realidad objetiva, lo mismo que el de una causalidad determinada por el mecanismo de la naturaleza. Mas el concepto de una causalidad de la naturaleza, obrando conforme a la regla de los fines, y con mayor motivo, conforme a la regla de un ser o de una causa primera de la naturaleza, que excede toda experiencia, este concepto no puede determinar nada dogmáticamente, aunque no encierre contradicción. Porque como no se le puede derivar de la experiencia, y aún no es necesario a la posibilidad de ésta, no se puede, en manera alguna, asegurar su realidad objetiva. Mas, aunque se pudiera, ¿cómo las cosas que son dadas de una manera determinada por las producciones de un arte divino, pueden ser colocadas entre las producciones de la naturaleza, cuya aptitud para producir tales cosas por sus propias leyes, nos obligue a invocar una causa completamente diferente?

EL CONCEPTO DE UNA FINALIDAD OBJETIVA DE LA NATURALEZA
ES UN PRINCIPIO CRÍTICO DE LA RAZÓN PARA EL JUICIO REFLEXIVO

Hay una gran diferencia entre decir que la producción de ciertas cosas de la naturaleza, o aun de toda la naturaleza, no es posible más que por medio de una causa que se determina a obrar en vista de ciertos fines, y decir que conforme a la naturaleza particular de nuestras facultades de conocer, yo no puedo juzgar de la posibilidad de estas cosas y de su producción más que concibiendo una causa que obra conforme a fines, por consiguiente, un ser que produce de una manera análoga a la causalidad de un entendimiento. En el primer caso, yo pretendo afirmar algo sobre el objeto mismo, y estoy obligado a probar la realidad objetiva del concepto que yo admito; en el segundo, la razón no hace más que determinar cierto uso de nuestras facultades de conocer, conforme a su naturaleza y a sus condiciones esenciales, de donde se deriva su alcance y su límite. El primer principio es, pues, un principio objetivo para el juicio determinante; el segundo, no es más que un principio subjetivo para el juicio reflexivo, por consiguiente, una máxima de este juicio prescrita por la razón.

Luego es absolutamente indispensable suponer a la naturaleza un concepto de fin cuando se quieren estudiar sus producciones organizadas por una observación continuada, y, por consiguiente, este concepto es ya para el uso empírico de nuestra razón una máxima absolutamente necesaria. Es claro también que cuando una vez hemos admitido y probado esta guía que nos sirve para estudiar la naturaleza, debemos ensayar al menos el aplicar esta misma máxima del juicio al conjunto de la naturaleza, porque ésta puede todavía hacernos descubrir muchas leyes que para nosotros quedarían ocultas, a causa de nuestra incapacidad para penetrar por completo en el interior del mecanismo de la naturaleza. Mas si, bajo este último respecto, esta máxima del juicio es todavía útil, ella no es indispensable, puesto que la naturaleza en su conjunto no se nos da como organizada (en este sentido estricto de la palabra, que hemos indicado anteriormente).²⁸ Ella es, al contrario, esencialmente necesaria, relativamente a ciertas producciones organizadas de la naturaleza, porque para llegar a conocer por medio de la experiencia su constitución interior, debemos juzgarlas como habiendo sido formadas únicamente conforme a fines, y no podemos concebirlas como cosas organizadas, sin relacionarse con ellas la idea de una producción intencional.

²⁸ Kant se refiere presumiblemente a la organización en sentido estricto, como la causación recíproca descrita anteriormente en §§ 63 y §§ 64. [Párrafos 2 y 3 en este volumen. (E.)]

Luego, el concepto de una cosa, cuya existencia o forma nos representamos como posible bajo la condición de un fin, es inseparable del concepto de la contingencia de esta cosa (relativamente a las leyes de la naturaleza). Es porque las cosas de la naturaleza que no hallamos posibles más que como fines, forman la principal prueba de la contingencia del universo, y el solo argumento que conduce al sentido común y a los filósofos a relacionar el mundo con un ser existente fuera de él e inteligente (a causa de esta finalidad); y la teleología no halla explicación última de sus investigaciones mas que en una teología.

Pero ¿qué prueba en definitiva la teleología perfecta? ¿Prueba la existencia de este ser inteligente? No. No prueba nada más sino que, conforme a la naturaleza de nuestras facultades de conocer, por consiguiente, en la unión de la experiencia con los principios superiores de la razón, no podemos formarnos ninguna idea de la posibilidad de este mundo, más que concibiendo una causa suprema, obrando con intención. Objetivamente, no podemos demostrar esta proposición, de que hay un Ser supremo inteligente; no podemos más que aplicarla subjetivamente al uso de nuestro juicio en su reflexión sobre los fines de la naturaleza, que no podemos concebir con la ayuda de otro principio que el de una causalidad intencional de una causa suprema.

Que si nosotros queremos demostrar esta proposición dogmáticamente por razones teleológicas, caeríamos en inextricables dificultades. Ella serviría entonces de principio a esta conclusión, de que los seres organizados en el mundo no son posibles más que por una causa intencional, y deberíamos inevitablemente afirmar, que como no podemos considerar estas cosas en su relación causal y reconocer las leyes a que se hallan sometidas, más que por medio de la idea de fin, tenemos también el derecho de suponer que esto es igualmente necesario para todo ser pensante y consciente, y que, por consiguiente, es una condición inherente al objeto, y no tan sólo al sujeto. Luego hay en esto una aserción que somos incapaces de sostener. Porque como la observación no nos muestra verdaderamente la intencionalidad en los fines de la naturaleza, sino que solamente en nuestra reflexión sobre sus producciones, nosotros añadimos este concepto por el pensamiento como bello conductor del juicio; ellas no nos son dadas por el objeto. Nos es del todo imposible probar *a priori* el valor objetivo de este concepto. No queda absolutamente más que una proposición que descansa sobre condiciones subjetivas, es decir, sobre las condiciones del juicio, conformado su reflexión con nuestras facultades de conocer. Decir que hay un Dios sería atribuir a esta proposición un valor objetivamente dogmático; mas la sola cosa que no es permitido a nosotros, hombres, decir, es simplemente que nos es imposible concebir y

comprender la finalidad, que debe por sí misma servir de principio a nuestro conocimiento de la posibilidad interior de muchas cosas de la naturaleza, más que representándonoslas, así como el mundo en general, como una producción de una causa inteligente (de un Dios).

Luego si esta proposición, fundada sobre una máxima absolutamente necesaria de nuestro juicio, es perfectamente satisfactoria para el uso especulativo y práctico de nuestra razón, bajo un punto de vista humano, yo querría saber lo que perdemos al no poder demostrar su validez para seres superiores, es decir, para principios, puros objetivos (que desgraciadamente exceden el alcance de nuestras facultades). Es, en efecto, absolutamente cierto que no podemos aprender a conocer de una manera suficiente, y con mayor motivo, a explicar los seres organizados y su posibilidad interior por principios puramente mecánicos de la naturaleza; y se puede sostener sin temor con igual certeza que es absurdo para los hombres intentar semejante cosa, y esperar que algún nuevo Newton vendrá un día a explicar la producción de un tallo de yerba por leyes naturales, a las que no presida designio alguno; porque éste es un procedimiento que se debe rehusar completamente a los hombres en absoluto.²⁹ Mas en compensación se podrá muy bien tener la presunción de juzgar, que aun cuando pudiésemos penetrar hasta el principio de la naturaleza en la especificación de las leyes universales que conocemos, no podríamos hallar un principio de la posibilidad de los seres organizados que nos dispensará de referir la producción a un designio; porque ¿cómo podemos saber esto? La verosimilitud no basta allí donde se trata de juicios de la razón pura. No podemos decidir, pues, objetivamente, sea de una manera afirmativa, sea de una manera negativa, la cuestión de saber si hay un ser que obra conforme a fines, que como causa (por consiguiente, como autor del mundo) sirve de principio, a lo que llamamos con razón fines de la naturaleza. Todo lo que hay de cierto es que si juzgamos, según lo que nuestra propia naturaleza nos permite percibir (conforme a las condiciones y a los límites de nuestra razón), no podemos dar por principio a la posibilidad de estos fines de la naturaleza más que un ser inteligente. Esto sólo en efecto es conforme a la máxima de nuestro juicio reflexivo, por consiguiente, a un principio subjetivo pero necesariamente inherente a la especie humana.

²⁹ Véase I. Kant, *Idee zu einer allgemeinen Geschichte in weltbürgerlicher Absicht*, 1: 229-230. [Versión en español: *Idea para una historia universal en clave cosmopolita*, UNAM, México, 2006.]

OBSERVACIÓN

Esta observación, que merece desenvolverse con toda extensión en la filosofía trascendental, debe servir aquí de esclarecimiento (y no de prueba) de lo hasta ahora expuesto.

La razón es una facultad que suministra principios, y, en último término, alcanza a la incondicionalidad. En contraste, el entendimiento está a su servicio únicamente bajo ciertas condiciones dadas. Mas sin los conceptos del entendimiento, a los cuales es necesario atribuir una realidad objetiva, la razón no puede juzgar objetivamente (sintéticamente), y en tanto que razón teórica, no contiene por sí misma principios constitutivos, sino solamente principios reguladores. Se ve claramente que allí donde el entendimiento no puede seguirla, la razón es trascendente, y se manifiesta por ideas, que tienen sin duda su fundamento (en tanto que principios reguladores), pero que no tiene ningún valor objetivo; y el entendimiento que no puede acompañarla, y que sólo puede tener este valor, encierra el de estas ideas racionales en los límites del sujeto, extendiéndolo solamente a todos los sujetos de la misma especie. De este modo se nos da el derecho de afirmar una sola cosa, y es que conforme a la naturaleza (humana) de nuestra facultad de conocer, o aun en general conforme al concepto que podemos formar de la razón de un ser finito, no podemos ni debemos concebir ninguna otra cosa, pero no nos es permitido afirmar que el principio de un juicio semejante esté en el objeto. Los ejemplos que acabamos de citar tienen demasiada importancia, y ofrecen también demasiada dificultad para que queramos imponerlos inmediatamente al lector como proposiciones demostrables, pero darán ocasión ellos a reflexionar, y podría servir para esclarecer lo que aquí particularmente nos proponemos.

Es de todo punto necesario al entendimiento humano distinguir la posibilidad y la realidad de las cosas. El principio de esta distinción está en el sujeto y en la naturaleza de sus facultades de conocer. En efecto, si el ejercicio de estas facultades no supusiera dos elementos del todo heterogéneos, el entendimiento para los conceptos, y la intuición sensible para los objetos que corresponden a estos conceptos, esta distinción (entre lo posible y lo real) no existiría. Si nuestro entendimiento fuera intuitivo, no habría otros objetos más que lo real. Los conceptos (que no miran más que a la posibilidad de un objeto) y las intuiciones sensibles (que nos dan algo sin que, a pesar, nos lo hagan conocer como objeto) se desvanecerían juntamente. Luego toda la distinción de lo puramente posible y de lo real descansa sólo sobre esto: que el primero significa la posición de la repre-

sentación de una cosa relativamente a nuestro concepto, y en general, a la facultad de pensar, mientras que el segundo significa la posición de la cosa en sí misma (fuera de este concepto).³⁰ Por consiguiente, la distinción de las cosas posibles y de las cosas reales no tiene más que un valor subjetivo para el entendimiento humano, porque no podemos siempre concebir algo que no exista, o representarnos alguna cosa como dada sin tener todavía ningún concepto de ella. La proposición de que las cosas pueden ser posibles sin ser reales, y que por consiguiente no se puede concluir de la simple posibilidad a la realidad, no tiene, pues, valor real más que para la razón humana, y nada prueba mejor que esta distinción tiene su principio en las cosas mismas. En efecto, que no se tiene el derecho de sacar esta consecuencia, y que, por consiguiente, esta proposición se aplica simplemente a los objetos, en tanto que nuestra facultad de conocer los considera bajo sus condiciones sensibles, como objetos sensibles, y que no tienen ningún valor relativamente a las cosas en general, es lo que resulta claramente de la orden imperiosa que nos da la razón de admitir como existente de una manera absolutamente necesaria, algo (el principio primero) en que la posibilidad y la realidad se confunden y cuya idea ningún concepto del entendimiento puede seguir; lo que quiere decir que el entendimiento no puede, bajo ningún respecto, representarse una cosa semejante y su modo de existencia. Porque si la concibe (concíbala como quiera) no se la representa más que como posible. Que si se tiene conciencia como de algo, que es dado en la intuición, es real, pero no se concibe nada tocante a su posibilidad. Es porque el concepto de un ser absolutamente necesario es, en verdad, una idea indispensable de la razón, pero es un concepto problemático e inaccesible para el entendimiento humano. Hay un valor para el uso de nuestras facultades de conocer, consideradas en su naturaleza particular; no lo hay relativamente al objeto, y para todo ser que conoce; porque yo no puedo suponer que el pensamiento y la intuición son en todo ser que conoce dos condiciones distintas del ejercicio de sus facultades de conocer. Un entendimiento, para que esta distinción no existiera, juzgaría que todos los objetos que conocemos son (existen); y la posibilidad de algunos objetos, que sin embargo, no existen, es decir, la contingencia de estos objetos, cuando existen, y por consiguiente, también la necesidad, que es necesario distinguir de esta contingencia, no caerían bajo su representación. Mas la dificultad que halla nuestro entendimiento para tratar aquí sus conceptos a ejemplo de la razón, viene únicamente de que aquello de que la

³⁰ Véase la explicación de Kant sobre las condiciones empíricas para la aplicación de los conceptos de la posibilidad y la actualidad en la *Crítica de la razón pura*, "Los postulados del pensamiento empírico en general", A 218-235/ B 265-287.

razón hace un principio que emplea como perteneciente al objeto, es trascendente para el entendimiento, considerado como entendimiento humano (es decir, imposible en las condiciones subjetivas de su conocimiento). Luego queda siempre esta máxima, que todos los objetos, cuyo conocimiento excede la facultad del entendimiento, no los concebimos más que conforme a las condiciones subjetivas necesariamente inherentes a nuestra naturaleza (es decir, a la naturaleza humana), del ejercicio de nuestras facultades; y si los juicios que formamos de este modo (y no puede ser de otra manera relativamente a los conceptos trascendentes) no pueden ser principios constitutivos que determinen el objeto tal como es, quedan, sin embargo, como principios reguladores, inmanentes y seguros en el uso que de ellos se hace, y propios para las necesidades de nuestro espíritu.

Del mismo modo que la razón, en la contemplación teórica de la naturaleza debe admitir la idea de la necesidad incondicional de un primer principio, así, bajo el punto de vista práctico, presupone en sí misma una causalidad incondicional (relativamente a la naturaleza), es decir, a la libertad, por esto mismo que tiene conciencia de su ley moral. Luego aquí, puesto que la necesidad objetiva de la acción, como deber, se halla opuesta a aquella a que esta acción quedaría sometida como suceso, si su principio estuviera en la naturaleza y no en la libertad, es decir, en la causalidad de la razón, y que la acción absolutamente necesaria moralmente es considerada físicamente como del todo contingente (es decir, que debería necesariamente tener lugar pero que muchas veces no lo tiene), es claro que es necesario buscar únicamente en la naturaleza de nuestra facultad práctica la causa porque las leyes morales deben representarse como órdenes (y las acciones conformes a estas leyes, como deberes) y porque la razón no expresa esta necesidad para ser (llegar), sino para deber ser. No sucedería así si se considerase la razón sin la sensibilidad (como condición subjetiva de su aplicación a los objetos de la naturaleza), por consiguiente, como causa en un mundo inteligible que estuviera siempre completamente de acuerdo con la ley moral, y en el cual no hubiera distinción entre deber y hacer, entre lo posible y lo real, es decir, entre la ley práctica, que prescribe lo primero, y la ley teórica que determina lo segundo. Luego, aunque un mundo inteligible, en donde todo lo que es posible (en tanto que bien) sea real por esto sólo, aunque la libertad misma, como condición formal de este mundo, sea para nosotros un concepto trascendente, que no pueda suministrarnos ningún principio constitutivo para determinar un objeto y su realidad objetiva, sin embargo, conforme a la constitución de nuestra naturaleza (en parte sensible), la libertad es para nosotros, y para todos los seres racionales, en relación con el mundo sensible, en tanto que podemos representárnoslos conforme a

la naturaleza de nuestra razón, un principio regulador universal, que no determina objetivamente la naturaleza de la libertad, como forma de la causalidad, pero que no prescribe menos imperiosamente a cada uno conforme a esta idea, la regla de sus acciones. Del mismo modo, también, en cuanto a la cuestión que nos ocupa, se puede asegurar que no encontraríamos distinción entre el mecanismo y la técnica de la naturaleza, es decir, en el enlace de los fines de la naturaleza, si nuestro entendimiento no estuviera formado de tal suerte que deba ir de lo general a lo particular, y que la facultad de juzgar no puede, relativamente a lo particular, reconocer finalidad, y, por consiguiente, formar juicios determinantes, sin tener una ley general bajo la cual pueda subsumirlo. Luego, como lo particular; como tal, contiene relativamente a lo general, algo de contingente, pero que, sin embargo, la razón exige también unidad en el enlace de las leyes particulares de la naturaleza, y por consiguiente, conformidad a leyes (la cual aplicada a lo contingente se llama finalidad) y como es imposible derivar *a priori*, por la determinación del concepto del objeto, las leyes particulares de las leyes generales, relativamente a lo que ellas tienen de contingente, el concepto de la finalidad de la naturaleza en sus producciones es un concepto necesario al juicio humano, relativamente a la naturaleza, pero no concierne a la determinación de los objetos mismos. Es, por consiguiente, un principio subjetivo de la razón para el juicio, y este principio, en tanto que regulador (y no en tanto que constitutivo), es tan necesario a nuestro juicio humano como si fuera un principio objetivo.

DE LA PROPIEDAD DEL ENTENDIMIENTO HUMANO
POR LA CUAL EL CONCEPTO DE UN FIN DE LA NATURALEZA
ES POSIBLE PARA NOSOTROS

Hemos indicado en la precedente observación las propiedades de nuestra facultad de conocer (superior), que somos inclinados a transportar las cosas mismas como predicados objetivos; mas ellas no conciernen más que a ideas a las cuales no se puede llegar en la experiencia del objeto correspondiente, y no pueden servir más que de principios reguladores en las investigaciones empíricas. Es al concepto de un fin de la naturaleza como a lo que concierne la causa de la posibilidad de esta suerte de predicados, la cual no puede descansar más que en la idea; pero el efecto, conforme a esta idea (la producción misma), es, sin embargo, dada en la naturaleza, y el concepto de una causalidad de la naturaleza, considerado como un ser que obra conforme a fines, parece hacer de la idea de un fin de la naturale-

za un principio constitutivo de este fin, y por esto esta idea se distingue de todas las demás.

Este carácter distintivo consiste en que la idea concebida no es un principio racional para el entendimiento, sino para el juicio, y no es, por consiguiente, más que la aplicación de un entendimiento en general a los objetos empíricos posibles, en los casos en que el juicio no puede ser determinante, sino simplemente reflexivo, y en donde, por consiguiente, aunque el objeto sea dado en la apariencia, no se puede juzgar de él, conforme a la idea, de una manera determinada (todavía menos de una manera perfectamente adecuada a esta idea), sino solamente reflexionar acerca de él. Se trata, pues, de una propiedad de nuestro (humano) entendimiento, relativa a la facultad de juzgar en su reflexión sobre las cosas de la naturaleza. Si es así, debemos tomar aquí por principio la idea de un entendimiento posible, otro que el entendimiento humano (del mismo modo que en la crítica de la razón pura) deberíamos concebir otra intuición posible para poder mirar la nuestra como una especie particular de intuición, es decir, como una intuición (por la cual los objetos no tuvieran valor más que en tanto que fenómenos),³¹ a fin de poder decir que, conforme a la naturaleza particular de nuestro entendimiento, debemos, para explicar la posibilidad de ciertas producciones de la naturaleza, considerar estas producciones como intencionales, y como habiendo sido producidas, conforme a fines, sin exigir por esto que haya una causa particular, determinada por la representación misma de un fin y por consiguiente, sin negar que un entendimiento, otro más elevado que el entendimiento humano, pueda hallar también el principio de la posibilidad de estas producciones (de la naturaleza) en el mecanismo de la misma, es decir, en una relación causal, cuya causa no se busca exclusivamente en un entendimiento.

No se trata, pues, aquí más que de la relación de nuestro entendimiento con el juicio: buscamos en su naturaleza una cierta contingencia que podríamos considerar como algo que le es particular y le distingue de otros elementos posibles.

Esta contingencia se halla naturalmente en lo que el juicio debe reducir a lo general, suministrado por los conceptos del entendimiento; porque, por lo general de nuestro (humano) entendimiento, no se determina lo particular. ¿De cuántos modos diversos cosas que, sin embargo, convienen en un carácter común, se pueden presentar a nuestra percepción? Es cosa contingente. Nuestro entendi-

³¹ En la *Crítica de la razón pura* Kant diferencia el intelecto humano, el cual requiere para el conocimiento tanto las intuiciones como los conceptos, de la intuición intelectual, en la cual los conceptos también proporcionarían sus propios objetos, en B 145, B 150, A 252/B 308-309 y A 256/B 311-312. Para una explicación temprana de la naturaleza discursiva del entendimiento humano, véase R 1832 (1772-1775?), 16: 131.

miento es una facultad de conceptos, es decir, un entendimiento discursivo, por el cual la especie y la diferencia de los elementos particulares que halla en la naturaleza, y que puede reducir a sus conceptos, son contingentes. Mas como la intuición pertenece también al conocimiento, y como una facultad que consistiera en una intuición enteramente espontánea, sería una facultad de conocer distinta y del todo independiente de la sensibilidad, y por consiguiente, un entendimiento en el sentido más general de la palabra, se puede también concebir (de una manera negativa, es decir, como un entendimiento que no es discursivo), un entendimiento intuitivo que no vaya de lo general a lo particular y a lo individual (por medio de conceptos), y para el cual no exista la contingencia del acuerdo de la naturaleza con el entendimiento en las cosas que produce conforme a leyes particulares, y cuya variedad es tan difícil a nuestro entendimiento reducir a la unidad del conocimiento. Esto no es posible para nosotros más que por medio del concierto de los caracteres de la naturaleza con nuestra facultad de los conceptos, y este concierto es contingente, mas un entendimiento intuitivo no lo necesita.

Nuestro entendimiento tiene, pues, esto de particular en su relación con el juicio; que en el conocimiento que nos suministra, lo particular no es determinado por lo general, y que, por consiguiente, lo primero no puede derivarse de lo segundo, aunque debía haber entre los elementos particulares que componen la variedad de la naturaleza y lo general (suministrado por conceptos y leyes), una concordancia que permitiera subsumir, aquéllos bajo éste, y que, en tales circunstancias, debe ser enteramente contingente, y no supone principio determinado para el juicio.

Luego para poder al menos concebir la posibilidad de este concierto de las cosas de la naturaleza con el juicio (que nos representamos como contingente, por consiguiente, como no siendo posible más que para un fin), es necesario que concibamos al mismo tiempo otro entendimiento, por cuya relación podamos, aun antes de atribuirle ningún fin, representarnos como necesario este concierto de las leyes de la naturaleza con nuestro juicio, que no es concebible para nuestro entendimiento más que por medio de la relación de los fines.

Nuestro entendimiento tiene, pues, esta propiedad, que en su conocimiento, por ejemplo, de la causa de una producción, debe ir de lo general analítico (de los conceptos) a lo particular (o la intuición empírica dada), mas sin determinar nada por esto relativamente a la variedad que se puede encontrar en lo particular, porque esta determinación, de la que necesita el juicio, no puede buscarla más que en la subsunción de la intuición empírica (cuando el objeto es una producción de la naturaleza), bajo el concepto. Luego podemos también concebir un entendi-

miento que, no siendo discursivo como el nuestro, sino intuitivo, vaya de lo general sintético (de la intuición de un todo como tal) a lo particular, es decir, del todo a las partes, y que, por consiguiente, no se represente la contingencia del enlace de las partes para concebir la posibilidad de una forma determinada del todo, a diferencia de nuestro entendimiento que va de las partes, como de los principios universalmente concebidos, a las diversas formas posibles que pueden subsumirse como consecuencias. Conforme a la constitución de nuestro entendimiento, no podemos considerar un todo real de la naturaleza más que como un efecto del concurso de las fuerzas motrices de las partes. Si, pues, queremos representarnos no en la posibilidad del todo como dependiente de la parte, así como lo exige nuestro entendimiento discursivo, sino, por el contrario, conforme al modelo del entendimiento intuitivo, la posibilidad de las partes (consideradas en su naturaleza y en su relación) como dependientes del todo, no podemos concebir en virtud de la misma propiedad de nuestro entendimiento, que el todo contenga el principio de la posibilidad de la relación de las partes (lo que sería una contradicción en el conocimiento discursivo), sino en la representación del todo en que colocamos el principio de la posibilidad de la forma de este todo y de la relación de las partes que lo constituyen. Luego como el todo sería entonces un efecto (una producción) del que se considera como causa la representación de la posibilidad misma, y como se llama fin el producto de una causa, cuya razón determinante es la representación misma de un efecto, se sigue de aquí, que si no nos representamos la posibilidad de ciertas producciones de la naturaleza más que a favor de otra especie de causalidad que la de las leyes naturales de la materia, es decir, a favor de las causas finales, es únicamente en virtud de la naturaleza particular de nuestro entendimiento, y que este principio no concierne a la posibilidad de estas cosas (aun consideradas como fenómenos), para este modo de producción, sino a aquella solamente del juicio que nuestro entendimiento puede formar sobre estas cosas. Por esto veremos también por qué en la ciencia de la naturaleza no nos contentamos por mucho tiempo con esta explicación de las producciones de la naturaleza por medio de las causas finales. Es que, en efecto, en esta explicación no pretendemos juzgar la producción de la naturaleza más que conforme a nuestra facultad de juzgar, es decir, al juicio reflexivo, y no conforme a las cosas mismas, por el juicio determinante. Por lo demás no es necesario probar la posibilidad de semejante *intellectus archetypus*; basta mostrar que la consideración de nuestro entendimiento discursivo, que tiene necesidad de imágenes (*intellectus typus*) y de su naturaleza contingente, nos conduce a esta idea (de un *intellectus archetypus*), y que esta idea no encierra contradicción.

Que si consideramos en su forma un todo material, como un producto de las partes o de las propiedades que éstas tienen de unirse por sí mismas (y aun de agregarse a otras materias) nos representamos un modo mecánico de producciones. Mas entonces desaparece todo concepto de un todo concebido como fin, es decir, de un todo, cuya posibilidad interna supone una idea de este todo, de donde depende la naturaleza y la acción de las partes, de un todo, en fin, tal y como debemos representarnos los cuerpos organizados. Mas de aquí no se sigue, como hemos mostrado anteriormente, que la producción mecánica de un cuerpo semejante sea imposible, porque esto significaría que es imposible (es decir, contradictorio) a todo entendimiento representarse tal unidad en la relación de las partes, sin darle por causa productora la idea de esta misma unidad, es decir, sin admitir una producción intencional. Es, sin embargo, lo que sucedería, siuviésemos el derecho de mirar los seres materiales como las cosas en sí. Porque entonces la unidad, que constituye el principio de la posibilidad de las formaciones de la naturaleza, sería simplemente la unidad del espacio, el cual no es un principio real de las producciones, aunque tenga con el principio real que buscamos alguna semejanza, puesto que en él ninguna parte puede ser determinada sin relación al todo (cuya representación sirve, por consiguiente, de principio a la posibilidad de las partes).³²

Mas como es al menos posible considerar el mundo material como un simple fenómeno, y concebir algo, en tanto que cosa en sí (que no sea fenómeno) como un *substratum* al cual correspondiera una intuición intelectual (diferente de la nuestra), se podría concebir un principio suprasensible, real, aunque inaccesible a nuestra inteligencia, de donde derivaría la naturaleza de que nosotros mismos formamos parte, de suerte que consideraríamos conforme a leyes mecánicas lo que en la naturaleza es necesario como objeto de los sentidos, pero también conforme a leyes teleológicas, considerándola como objeto de la razón, la concordancia y la unidad de las leyes particulares y de las formas que debemos mirar como contingentes (y aun el conjunto de la naturaleza en tanto que sistema), y la juzgaríamos también según dos especies de principios, sin destruir la explicación mecánica por la explicación teleológica, como si fuesen contradictorias.

Se ve por esto, lo que era por otra parte fácil de suponer, pero que sería difícil de afirmar y de probar con certeza, que en las producciones de la naturaleza don-

³² Aquí Kant se refiere a la doctrina de la *Crítica de la razón pura*, que argumenta que el espacio no es un agregado compuesto de las regiones del espacio que existen independientemente de él, en cuanto partes, sino que más bien es un conjunto donde las regiones particulares sólo se pueden introducir mediante la inclusión de límites en él; véase A 25/B 39.

de hallamos cierta finalidad, el principio mecánico puede subsistir sin duda al lado del principio teleológico, pero que sería imposible hacer este último enteramente inútil. Se puede, en efecto, en el estudio de una cosa que debemos juzgar como un fin de la naturaleza (en el estudio de un ser organizado), buscar todas las leyes, ya conocidas o todavía por descubrir, de la producción mecánica, y conseguirlo en este sentido; mas para explicar la posibilidad de una producción semejante, no se nos puede jamás dispensar de invocar un principio de producción enteramente diferente del principio mecánico, a saber, el de una causalidad determinada por fines, y no hay razón humana (una razón finita y semejante a la nuestra por la cualidad, por más superior que fuese en el grado) que pueda prometerse explicar la producción de un simple tallo de yerba por causas puramente mecánicas. En efecto; si el juicio necesita indispensablemente de la relación teleológica de las causas y los efectos, para explicar la posibilidad de semejante objeto, y aun para estudiarlo con la guía de la experiencia; si no se puede hallar para los objetos exteriores, considerados como fenómenos, un principio que se refiera a los fines, y si este principio, que reside también en la naturaleza, debe buscarse únicamente en su *substratum* suprasensible que no nos es permitido penetrar, nos es absolutamente imposible explicar las relaciones de fines por principios llevados a la naturaleza misma, y nuestra humana facultad de conocer nos da una ley necesaria para buscar el supremo principio en un entendimiento originario como causa del mundo.

DE LA UNIÓN DEL PRINCIPIO DEL MECANISMO UNIVERSAL
DE LA MATERIA CON EL PRINCIPIO TELEOLÓGICO
EN LA TÉCNICA DE LA NATURALEZA

Es de la mayor importancia para la razón no perder de vista el principio del mecanismo en la explicación de las producciones de la naturaleza, porque es imposible sin este principio adquirir el menor conocimiento de la naturaleza de las cosas. Aun cuando se nos concediera que un arquitecto supremo ha creado inmediatamente las formas de la naturaleza tal y como existen desde entonces, o que ha predeterminado aquellas que en el curso de la naturaleza se forman continuamente sobre el mismo modelo, nuestro conocimiento de la naturaleza no sería nada ilustrado, porque no conocemos la manera de obrar de este ser y sus ideas, que deben contener los principios de la posibilidad de las cosas de la naturaleza, y no podemos explicar la naturaleza por este ser, yendo, por decirlo así, de

alto a bajo (*a priori*). Que si queremos, partiendo de las formas de los objetos de la experiencia y yendo así de abajo arriba (*a posteriori*), invocar, para explicar la finalidad que creemos encontrar en ellos, una causa que obre conforme a fines, no daremos más que una explicación tautológica, y equivocaremos la razón con palabras, para no decir más, desde que nos dejamos extraviar por este género de explicación en lo trascendental a donde no puede seguirnos el conocimiento natural, que la razón cae en estas poéticas extravagancias que su principal deber es evitar.

De otro lado, es una máxima igualmente necesaria de la razón no omitir el principio de los fines en el estudio de las producciones de la naturaleza, porque si bien este principio no nos hace comprender mejor el modo en que estas producciones se han originado, es un principio heurístico en la investigación de las leyes particulares de la naturaleza, incluso dando por sentado que no queramos hacer ningún uso de él para explicar la naturaleza misma, y que se ha continuado sirviéndose de la expresión fines de la naturaleza, aunque la naturaleza revela manifiestamente una unidad intencional, es decir, aunque no se busque más allá de la naturaleza el principio de la posibilidad de sus fines. Mas como es necesario venir en definitiva a averiguar esta posibilidad, es también necesario concebir, para explicarla, una especie particular de causalidad que no se presenta en la naturaleza, como la mecánica de las causas naturales tiene la suya, puesto que la receptividad que muestra la materia para muchas formas, distintas de aquellas de las cuales ella es capaz en virtud de esta última, supone la espontaneidad de una causa (que por consiguiente no puede ser materia), sin la cual no se podría hallar el principio de estas formas. La razón, en verdad, antes de dar este paso, debe mostrar mucha prudencia, y no pretender explicar como teleológica toda técnica de la naturaleza; hablo de cierto poder que tiene la naturaleza de producir figuras que muestran la finalidad para nuestra simple aprehensión (como los cuerpos regulares); es necesario que se limite siempre a mirarla como mecánicamente posible. Mas querer además excluir absolutamente el principio teleológico y allí donde la razón, buscando la posibilidad de las formas de la naturaleza, halla una posibilidad que se muestra manifiestamente ligada a otra especie de causalidad, pretender seguir siempre el simple mecanismo, sería llevar la razón a divagaciones tan quiméricas sobre las impenetrables potencias de la naturaleza, como aquellas que pudiesen entrañar una explicación puramente teleológica y no teniendo en cuenta el mecanismo de la naturaleza.

En una sola y misma cosa no se pueden admitir juntamente los dos principios, explicando el uno por el otro (deduciendo el uno del otro), es decir, que no

se pueden asociar como principios dogmáticos y constitutivos del conocimiento de la naturaleza para el juicio determinante. Si por ejemplo, yo digo que un gusano debe considerarse como una producción del simple mecanismo de la materia (un resultado de esta nueva formación que se produce por sí misma, cuando los elementos de la materia han sido puestos en libertad por la corrupción), no podemos derivar entonces esta producción de la misma materia como de una causalidad que obra conforme a fines. Recíprocamente, si miramos esta producción como un fin de la naturaleza, no podemos invocar un modo mecánico de explicación, y tomar éste por un principio constitutivo en el juicio que debemos formar sobre la posibilidad de esta producción, de modo que se asocien los dos principios. En efecto, un modo de explicación excluye el otro, aun cuando objetivamente estos dos principios descansaran sobre uno solo, en el cual no pensaríamos. El principio que debe hacer posible la unión de los dos en nuestro juicio sobre la naturaleza debe colocarse en algo que resida fuera de ellos (por consiguiente también fuera de toda representación empírica posible de la naturaleza), pero que sea su fundamento, es decir, en lo suprasensible, y a esto es a lo que se deben reducir los dos modos de explicación. Luego como no podemos obtener nada relativamente a lo suprasensible más que el concepto indeterminado de un principio que permite juzgar la naturaleza, conforme a leyes empíricas, y como por otra parte no podemos determinarlo de antemano por ningún predicado, se sigue que la unión de los dos principios no puede descansar sobre otro que contenga la explicación de la posibilidad de una producción por leyes dadas para el juicio determinante, sino solamente sobre un principio que contenga la exposición para el juicio reflexivo.³³ En efecto, explicar significa derivar de un principio que se debe, por consiguiente, poder conocer y mostrar claramente. Luego si se considera una sola y misma producción, el principio del mecanismo y el de la técnica de la naturaleza, deben, en verdad, unirse en un solo principio superior, su origen común; de otro modo no podrían subsistir el uno al lado del otro en la consideración de la naturaleza. Mas si este principio, que es objetivamente común a los dos, y que por consiguiente permite conciliar las máximas que dependen de ellos, en la investigación de la naturaleza, si este principio es tal que se puede muy bien indicar, pero no conocer de una manera determinada y mostrarlo bien claramente para que se pueda hacer uso de él en todos los casos dados, es imposible sacar ninguna explicación de tal principio, es decir, derivar de él de una manera clara y determinada la posibilidad de una producción de la naturale-

³³ El comentario de Kant sobre estos principios en la *Crítica de la razón pura*, A 720/ B 758, sugiere que no es patente cuáles sean las diferencias precisas entre ellos.

za por medio de estos dos principios heterogéneos. Luego el principio común de donde derivan, de una parte el principio mecánico y de la otra el principio teleológico, es lo suprasensible, que debemos colocar bajo la naturaleza considerada como fenómeno. Mas es imposible tener bajo el punto de vista teórico el menor concepto determinado y afirmativo. No podemos, pues, explicar en manera alguna cómo en virtud de este principio, la naturaleza (considerada en sus leyes particulares), constituye para nosotros un sistema, que podemos mirar como posible, tanto por el principio de las causas físicas como por el de las causas finales; pero solamente cuando hallamos en la naturaleza de los objetos, cuya posibilidad no podemos concebir a favor del principio del mecanismo (que reivindica siempre las cosas de la naturaleza), y sin apoyarnos sobre principios teleológicos, creemos poder estudiar con confianza las leyes de la naturaleza conforme a estos dos principios (cuando nuestro entendimiento ha reconocido la posibilidad de sus producciones por uno u otro principio), y no nos dejamos llevar por la aparente contradicción de los principios de nuestro juicio sobre estos objetos, porque es cierto que pueden unirse al menos objetivamente en un solo principio (pues que se forman sobre fenómenos que suponen un principio suprasensible).

Aunque el principio del mecanismo y el de la técnica teleológica (intencional) de la naturaleza relativamente a la misma producción y a su posibilidad pudiesen subordinarse a un principio común de la naturaleza, considerada en sus leyes particulares, sin embargo, siendo trascendente este principio, los límites de nuestro entendimiento no nos permiten conciliar los dos principios en la explicación de la misma producción de la naturaleza, aun cuando no podamos concebir la posibilidad interior de esta producción más que por medio de una causalidad que obre conforme a fines (como sucede para las materias organizadas). Debemos siempre llegar a esta máxima del juicio teleológico que, conforme a la naturaleza del entendimiento humano, no podemos admitir otra causa para explicar la posibilidad de los seres organizados que una causa que obra según fines, y que el simple mecanismo de la naturaleza no nos da aquí una explicación suficiente, sin querer decidir nada por esto relativamente a la posibilidad de las cosas mismas.

Pero como este principio no es más que una máxima del juicio reflexivo y no del juicio determinante, y como, por consiguiente, no tiene para nosotros más que un valor subjetivo y no un valor objetivo, relativamente a la posibilidad misma de esta especie de cosas (en la cual los dos modos de producción podrían muy bien concertarse en un solo y mismo principio), como además, si a este modo de producción que se mira como teleológico no se juntara algún concepto de un mecanismo de la naturaleza que debe hallarse también en él, no se podría juzgar

esta producción como una producción de la naturaleza, esta máxima implica al mismo tiempo la necesidad de una unión de los dos principios en el juicio por el cual concebimos las cosas como fines de la naturaleza; en sí, pero sin tener por objeto sustituir enteramente o en parte el uno al otro. En efecto, a lo que no se concibe (al menos por nosotros) como posible más que por un fin, no se puede sustituir el mecanismo, y a lo que es reconocido como necesario en virtud del mecanismo, no se puede sustituir una contingencia que necesitaría de un fin como razón determinante, sino que se debe solamente subordinar uno de estos principios (el mecanismo) al otro (el de la técnica intencional), lo que puede hacerse en virtud del principio trascendental de la finalidad de la naturaleza.

En efecto; allí donde se conciben fines como principios de la posibilidad de ciertas cosas, es necesario también admitir medios, cuya ley de acción no necesita por sí misma de nada que suponga un fin, y puede, por consiguiente, ser mecánica, estando en un todo subordinada a efectos intencionales.

Es por lo que, cuando consideramos las producciones organizadas de la naturaleza, y principalmente cuando, observando el número infinito de estas producciones, admitimos (al menos como una hipótesis permitida) algo intencional en la relación de las causas naturales, que obran según leyes particulares, y de las que formamos el principio universal del juicio reflexivo, aplicado al conjunto de la naturaleza (al mundo), concebimos una grande y aun universal combinación de las leyes mecánicas con las leyes teleológicas, sin confundir los principios en cuya virtud juzgamos estas producciones, y sin sustituir el uno al otro. Porque en un juicio teleológico, si la forma que recibe una materia no puede juzgarse posible más que por medio de un fin, esta materia, considerada en su naturaleza conforme a leyes mecánicas, puede subordinarse como medio a este fin propuesto. Mas como el principio de esta unión reside en algo que no es ni el mecanismo ni la relación de los fines, sino el *substratum* suprasensible de la naturaleza, del que nada conocemos, nuestra humana razón no puede reunir juntamente las dos maneras de representarse la posibilidad de estos objetos, y no podemos juzgarlos, fundados sobre un entendimiento supremo más que por medio de la relación de las causas finales, lo que, por consiguiente, no quita nada al modo de explicación teleológica.

Luego como es cosa completamente indeterminada, y aun siempre indeterminable para nuestra razón, hasta qué punto el mecanismo de la naturaleza obra como medio para cada fin de la misma, y como el principio inteligible, al cual hemos referido la posibilidad de una naturaleza en general, nos permite admitir que esto es enteramente posible por un acuerdo universal de las dos especies de

leyes (las leyes físicas y las de las causas finales), aunque no podamos concebir el cómo de este acuerdo, no sabemos mejor hasta dónde se extiende el modo de explicación mecánico para nosotros; sino que solamente es cierto que, lejos de que pudiésemos marchar por este camino, él debe ser siempre insuficiente para las cosas que una vez hemos reconocido como fines de la naturaleza, y que así, conforme a la constitución de nuestro entendimiento, debemos subordinar todos estos principios juntamente a un principio teleológico.

De aquí el derecho, y también, a causa de la importancia del estudio mecánico de la naturaleza para la razón teórica, el deber de explicar mecánicamente, en tanto que esté en nosotros (y es imposible aquí trazar límites), todas las producciones y todos los hechos naturales, aun las cosas que revelan la mayor finalidad; mas también lo es no perder jamás de vista que las cosas que no podemos someter a la investigación de la razón más que bajo el concepto de fines, deben ser conformes a la naturaleza esencial de nuestra razón, sometidas en definitiva, a pesar de las causas mecánicas, a una causalidad que obra conforme a fines.

Erwin Schrödinger

IV. ¿QUÉ ES LA VIDA?*

(Fragmentos)

ÍNDOLE Y PROPÓSITO DE LA INVESTIGACIÓN

Este pequeño libro surgió de un curso de conferencias públicas impartidas por un físico teórico a una audiencia de aproximadamente 400 personas, cuya asistencia no menguó significativamente aunque se les hubiera advertido desde el inicio que el tema era difícil y que las conferencias no se podían calificar de populares, a pesar de que en ellas apenas se utilizaría el arma más temida del físico, la deducción matemática. La razón no era que el tema fuera lo suficientemente sencillo como para exponerse sin recurrir a las matemáticas, sino más bien que era demasiado complejo como para ser totalmente accesible mediante las matemáticas. Otro aspecto que al menos dotó de cierto cariz de popularidad a las conferencias fue la intención del conferenciante de clarificar, tanto en beneficio del físico como del biólogo, la idea fundamental, la cual se encuentra a medio camino entre la biología y la física.

Pues de hecho, a pesar de la diversidad de los temas implicados en ella, esta empresa en conjunto pretende transmitir una sola idea: un breve comentario acerca de una cuestión de gran magnitud e importancia. A fin de que no nos perdamos en el trayecto, podría ser útil delinear de antemano el proyecto sucintamente.

La gran cuestión, la importante y muy discutida cuestión es:

¿Cómo pueden explicar la física y la química los sucesos en *el espacio y el tiempo* que tienen lugar dentro del marco espacial de un organismo viviente?

La respuesta preliminar que este librito intentará exponer y establecer puede resumirse así:

La obvia incapacidad de la física y la química actuales para explicar tales sucesos no constituye en absoluto una razón para dudar que estas ciencias sean capaces de esclarecerlos.

* Este texto apareció originalmente como los capítulos 1, 5, 6 y 7 de E. Schrödinger, *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*, Cambridge University Press, Cambridge, 1944.

LA FÍSICA ESTADÍSTICA.
LA FUNDAMENTAL DIFERENCIA DE ESTRUCTURA

Sería el anterior un comentario muy trivial si sólo pretendiera estimular la esperanza de alcanzar en el futuro lo que no se ha logrado en el pasado. Pero su significado es mucho más positivo; a saber, que esta incapacidad, hasta la fecha, ha sido ampliamente explicada.

Hoy en día, gracias a la ingeniosa labor de los biólogos, muchos de ellos genetistas, a lo largo de los últimos 30 o 40 años se sabe lo suficiente sobre la verdadera estructura material de los organismos y sobre su funcionamiento como para afirmar que, y precisar por qué, la física y la química actuales no podían en absoluto explicar lo que sucede, en el espacio y el tiempo, dentro de un organismo viviente.

La ordenación de los átomos en las partes más vitales de un organismo y la interacción de estas ordenaciones difieren en forma fundamental de todas aquellas ordenaciones de átomos que hasta la fecha hayan sido objeto de las investigaciones experimentales y teóricas de los físicos y los químicos. Sin embargo, esta diferencia que anteriormente he calificado de fundamental es de un tipo tal que fácilmente pudiera parecerle mínimo a cualquiera que no sea un físico que sabe perfectamente que las leyes de la física y la química en su totalidad son estadísticas.¹ Pues es en relación con el punto de vista estadístico que la estructura de las partes vitales de los organismos vivientes es tan completamente diferente de la estructura de cualquier sustancia que nosotros los físicos y los químicos hayamos examinado físicamente en nuestros laboratorios o mentalmente en nuestros escritorios.² Es prácticamente impensable que las leyes y regularidades que hayamos descubierto así puedan aplicarse de manera inmediata al comportamiento de sistemas que no poseen la estructura en que se basan estas leyes y regularidades.

No se puede esperar que un profano pueda siquiera entender —no digamos apreciar la relevancia de— esa diferencia en la “estructura estadística” que acabo de exponer de una manera tan abstracta. A fin de darle a esta afirmación vida y co-

¹ Esta afirmación podría parecer demasiado general. Su discusión tendrá que aplazarse hasta el final de este libro, §§ 67 y 68. [Los apartados “El movimiento de un reloj” y “El funcionamiento al fin y al cabo estadístico de los mecanismos relojeros” en esta edición (comps.).]

² En dos trabajos muy inspiradores F. G. Donnan ha subrayado este punto de vista: “La science physico-chimique décrit-elle d’une façon adéquate les phénomènes bio-logiques?”, *Scientia*, 24 (78): 10, 1918, y “The Mystery of Life”, *Smithsonian Report for 1929*, p. 309.

lor, permítanme anticipar lo que posteriormente se explicará con mucho más detalle: a saber, que a la parte esencial de una célula —la fibra cromosómica— bien se le puede denominar *cristal aperiódico*. La física, hasta hoy, sólo se ha ocupado de los *cristales periódicos*. En la mente de un humilde físico, éstos son objetos muy interesantes y complejos; constituyen una de las más fascinantes y complejas estructuras materiales con que la naturaleza inanimada pone a prueba su inteligencia. No obstante, comparados con el cristal aperiódico, parecen bastante simples y monótonos. La diferencia en su estructura es del mismo tipo que se puede apreciar entre el papel pintado que adorna las paredes de una habitación, repitiendo el mismo diseño una y otra vez con regularidad periódica, y una obra maestra de la tapicería, por ejemplo, un tapiz de Rafael, que no muestra una repetición monótona, sino un diseño intrincado, coherente, sensible, trazado por un gran maestro.

Al describir el cristal periódico como uno de los más complejos objetos que puede investigar, yo pensaba en un físico propiamente. La química orgánica, sin duda alguna, mediante su investigación de moléculas cada vez más complejas, se ha acercado muchísimo más a ese “cristal aperiódico” que en mi opinión es el portador material de la vida. Y por ende resulta poco sorprendente que el químico orgánico haya hecho ya grandes contribuciones al problema de la vida, mientras que el físico casi ninguna.

EL PLANTEAMIENTO DEL TEMA POR UN FÍSICO INGENUO

Tras haber así indicado muy brevemente la idea general —o más bien la escala real— de nuestra investigación, permítanme describir el plan de ataque.

Me propongo desarrollar primero lo que se podría llamar “la idea que un físico ingenuo tiene sobre los organismos”, es decir, las ideas que podrían surgir en la mente de un físico que, habiendo asimilado la física y, más específicamente, los fundamentos estadísticos de su ciencia, empezara a pensar en los organismos y en la forma en que se comportan y funcionan, y llegara a preguntarse concienzudamente si él, a partir de lo que hubiera aprendido, desde el punto de vista de su relativamente sencilla y clara y humilde ciencia, pudiera hacer cualquier contribución significativa a la cuestión.

Resultaría que sí. El siguiente paso habría de ser que comparara sus previsiones teóricas con los hechos biológicos. Entonces resultaría que sus ideas —aunque en conjunto fueran bastante sensatas— tendrían que enmendarse

apreciablemente. De esta manera podremos acercarnos gradualmente al planteamiento correcto —o, para decirlo modestamente, al que yo propongo como correcto—.

Aun si resultara que yo estoy en lo correcto, no sé si mi planteamiento sería realmente el mejor y más sencillo. Pero, en una palabra, sería el mío. Yo soy el “científico ingenuo”. Y no he podido encontrar camino mejor o más claro hacia la meta, que mi propio camino enrevesado.

¿POR QUÉ SON TAN PEQUEÑOS LOS ÁTOMOS?

Un buen método para exponer “las ideas del científico ingenuo” está en iniciar con la vieja, casi ridícula pregunta: ¿por qué son tan pequeños los átomos? Para empezar, son realmente muy pequeños. Cualquier mínima porción de materia que manipulemos cotidianamente contiene una cantidad enorme de átomos. Se han ideado muchos ejemplos para demostrarle este hecho a una audiencia, ninguno de los cuales es más impresionante que el utilizado por lord Kelvin: Supongamos que uno de ustedes pudiera marcar las moléculas en el agua de un vaso y luego vertiera el contenido en el mar, removiéndolo minuciosamente a fin de distribuir uniformemente las moléculas marcadas a lo largo y ancho de los siete mares; si luego volviera a llenar su vaso en cualquier lugar con agua de mar, encontraría en éste aproximadamente 100 de las moléculas marcadas.³

El tamaño real de los átomos⁴ es aproximadamente entre 1/5 000 y 1/2 000 de la longitud de onda de la luz amarilla. Esta comparación es significativa, ya que la longitud de onda indica *grosso modo* las dimensiones del grano más pequeño que se pueda observar con un microscopio. Hay que señalar que aun así este grano contiene miles de millones de átomos.

Ahora bien, ¿por qué son tan pequeños los átomos?

³ Uno no encontraría, por supuesto, 100 (incluso si ése fuera el resultado exacto del cálculo). Uno podría encontrar 88 o 95, o 107 o 112, pero muy improbablemente menos de 50 o más de 150. Se puede esperar una “desviación” o “fluctuación” del orden de la raíz cuadrada de 100, es decir, 10. El estadístico expresa lo anterior afirmando que uno encontraría 100 ± 10 . Esta afirmación se puede ignorar por el momento, pero posteriormente se hará referencia a ella, al proporcionar un ejemplo de la ley estadística $\sqrt{n}$.

⁴ De acuerdo con las actuales ideas sobre este tema, un átomo carece de límites precisos, de modo que el “tamaño” de un átomo no es una idea muy precisa. Pero podemos identificar el tamaño (o, si ustedes lo permiten, remplazar el tamaño) con la distancia entre los centros de los átomos, en un sólido o en un líquido; no, desde luego, en el estado gaseoso, donde esta distancia es, con presión y temperatura normales, aproximadamente 10 veces mayor.

Obviamente, esta pregunta es una evasión. Pues no se relaciona en verdad con el tamaño de los átomos, sino con el tamaño de los organismos, particularmente con el tamaño de nuestro ser corpóreo. Sin duda, el átomo es pequeño cuando se compara con nuestra unidad cívica de longitud, ya sea la yarda o el metro. En la física atómica acostumbramos utilizar el llamado ángstrom (símbolo Å), la 10^{-10} parte de un metro, o, en la notación decimal, 0.0000000001 m. Los diámetros atómicos miden entre 1 y 2 Å. Ahora bien, esas unidades cívicas (en relación con las cuales los átomos son tan pequeños) se relacionan estrechamente con el tamaño de nuestro cuerpo. Hay una leyenda que hace remontar la creación de la yarda al humor de un rey inglés a quien sus consejeros le preguntaron qué tipo de unidad de medición habría que adoptar. El rey extendió su brazo a un lado y dijo: "Tomen la distancia desde la mitad de mi pecho hasta la punta de mis dedos, eso funcionará". Ya sea verdadera o no, la leyenda es significativa en relación con nuestro tema. El rey naturalmente elegiría una longitud comparable a la de su propio cuerpo, sabiendo que cualquier otra cosa sería muy inconveniente. A pesar de su predilección por la unidad ángstrom, el físico prefiere que el sastre le diga que su nuevo traje requiere seis yardas y media de tweed, y no 65 000 millones de ángstroms de tweed.

Habiéndose establecido que nuestra pregunta realmente apunta a la proporción de dos longitudes —la de nuestro cuerpo y la del átomo— y que indiscutiblemente la prioridad de una existencia independiente le pertenece al átomo, la pregunta real es: ¿por qué tiene que ser nuestro cuerpo tan grande, en comparación con el tamaño del átomo?

Imagino que más de un apasionado estudiante de la física o química ha podido deplorar el hecho de que todos nuestros órganos sensoriales, los cuales son parte más o menos considerable de nuestro cuerpo y por ende (desde el punto de vista de la proporción mencionada) se componen de innumerables átomos, sean demasiado burdos como para que los pueda afectar el impacto de un átomo. No podemos oír o sentir o ver los átomos. Nuestras hipótesis respecto a ellos difieren mucho de las percepciones inmediatas de nuestros burdos órganos sensoriales, y no pueden someterse a la prueba de la inspección directa.

¿Es necesario que sea así? ¿Hay una razón intrínseca para ello? ¿Podemos determinar el origen de esta situación en alguna especie de primer principio, a fin de averiguar y entender por qué todo lo demás es incompatible con las leyes mismas de la naturaleza?

Ahora bien, éste, excepcionalmente, es un problema que el físico sí es capaz de aclarar totalmente. Es afirmativa la respuesta a todas estas preguntas.

EL FUNCIONAMIENTO DE UN ORGANISMO
REQUIERE LEYES FÍSICAS EXACTAS

Si no fuera así, si nosotros fuéramos organismos tan sensibles que tan sólo un átomo, o incluso unos cuantos átomos, pudieran causar una impresión perceptible en nuestros sentidos... ¡Cielos, cómo sería la vida! Haré hincapié en un solo punto: un organismo de esa especie sin lugar a dudas no podría ser capaz de desarrollar el tipo de pensamiento ordenado que, tras haber pasado a través de una larga secuencia de etapas anteriores, finalmente ha logrado formarse, entre otras muchas ideas, la del átomo.

Aunque sólo hayamos seleccionado este único punto, nuestras siguientes consideraciones se podrían aplicar también al funcionamiento de otros órganos que no sean el cerebro y el sistema sensorial. Sin embargo, la única cosa de supremo interés para nosotros sobre nosotros es que podemos sentir y pensar y percibir. Todos los demás procesos fisiológicos tienen un papel auxiliar en este proceso responsable del pensamiento y de la percepción, al menos desde el punto de vista humano, si no desde la perspectiva de la biología puramente objetiva. Además, facilitará mucho nuestra tarea elegir para su investigación este proceso que se acompaña íntimamente de sucesos subjetivos, aun cuando ignoremos la verdadera naturaleza de este íntimo paralelismo. De hecho, yo pienso que éste se encuentra fuera del alcance de las ciencias naturales y muy probablemente fuera del alcance del entendimiento humano, de plano.

Así que tenemos que responder a la siguiente pregunta: ¿por qué un órgano como nuestro cerebro, junto con el sistema sensorial que está con él vinculado, necesariamente consiste en una enorme cantidad de átomos, a fin de que su estado físico cambiante se corresponda íntimamente con un proceso de pensamiento altamente desarrollado? ¿Cuál es el motivo de que el desempeño de este órgano sea incompatible con ser, en su totalidad o en alguna de sus partes periféricas que interactúan directamente con el medio ambiente, un mecanismo lo suficientemente refinado y sensible como para responder al impacto externo de un átomo y registrarlo?

La razón es que lo que llamamos pensamiento 1) es en sí mismo una cosa ordenada, y 2) sólo puede relacionarse con la materia, es decir, con percepciones o experiencias que posean un cierto grado de ordenación. Esto acarrea dos consecuencias. Primero, una organización física; para estar en correspondencia exacta con el pensamiento (como mi cerebro lo está con mi pensamiento) tiene que

ser una organización muy bien ordenada, lo que significa que los sucesos que tengan lugar en su interior deben obedecer con un muy alto grado de precisión, por lo menos, a estrictas leyes físicas. Segundo, las impresiones físicas externas en este sistema físicamente bien organizado, obviamente se corresponden con la percepción y la experiencia del pensamiento correspondiente, formando su materia, como yo la he llamado. Por lo tanto, las interacciones físicas entre nuestro sistema y los demás sistemas necesariamente deben poseer ellas mismas cierto grado de ordenación física, es decir, también deben obedecer con un cierto grado de precisión a leyes físicas estrictas.

LAS LEYES FÍSICAS SE BASAN EN ESTADÍSTICAS ATÓMICAS
Y POR LO TANTO SÓLO SON APROXIMATIVAS

¿Y por qué no podría todo esto ser cierto en el caso de un organismo que estuviera compuesto de una cantidad moderada de átomos y que fuera sensible al impacto de sólo uno o de unos cuantos átomos?

Porque sabemos que todos los átomos actúan todo el tiempo con un movimiento térmico totalmente desordenado, el cual, por decirlo así, se opone al comportamiento ordenado y no permite que los sucesos que tienen lugar entre una pequeña cantidad de átomos se organicen de acuerdo con cualesquiera leyes reconocibles. Es únicamente en el caso de la cooperación de una cantidad tremendamente enorme de átomos cuando empiezan a operar las leyes estadísticas y a controlar el comportamiento de tales *assemblées* con una precisión que aumenta con la cantidad de los átomos involucrados. Es de esta manera que los sucesos adquieren un aspecto verdaderamente ordenado. Todas las leyes físicas y químicas que sabemos que desempeñan un papel importante en la vida de los organismos son de este tipo estadístico; el incesante movimiento térmico de los átomos perpetuamente altera y vuelve inoperativo cualquier otro tipo de legalidad y ordenamiento que uno pudiera imaginar.

SU PRECISIÓN SE BASA EN LA GRAN CANTIDAD DE ÁTOMOS
INVOLUCRADOS. PRIMER EJEMPLO (PARAMAGNETISMO)

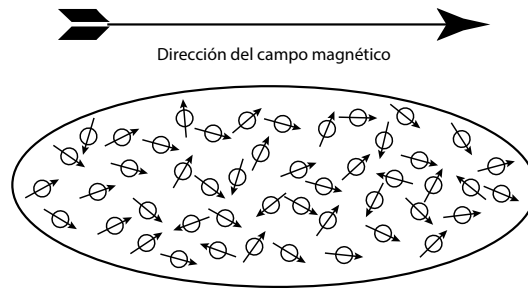
Permítanme ilustrar lo anterior mediante unos cuantos ejemplos, escogidos casi al azar entre miles, y acaso no los que puedan atraer a un lector que se adentra

por vez primera en esta condición de las cosas; condición que en la física y la química modernas es tan fundamental como lo es, digamos, en la biología, el hecho de que los organismos estén formados por células, o como lo es la ley de Newton en la astronomía, o incluso como lo es la serie de números enteros, 1, 2, 3, 4, 5... en la matemática. Un neófito no debe esperar que vaya a obtener de las siguientes páginas una comprensión y apreciación cabales de un tema que se asocia con los ilustres nombres de Ludwig Boltzmann y Willard Gibbs y se conoce en los libros de texto como la “termodinámica estadística”.

Si uno llena un tubo de cuarzo oblongo con oxígeno y lo coloca en un campo magnético, encuentra que el gas se magnetiza.⁵ Esta magnetización se debe al hecho de que las moléculas de oxígeno son pequeños imanes y tienden a orientarse paralelamente al campo, como la aguja de una brújula. Pero uno no debe pensar que en realidad todas giran paralelamente. Pues si se duplica el campo, también se duplica la magnetización del oxígeno, y esto continúa proporcionalmente hasta alcanzar campos de magnetismo extremadamente fuertes, al incrementarse la magnetización en proporción a la fuerza del campo.

Éste es un ejemplo particularmente claro de una ley puramente estadística. La orientación que el campo tiende a producir se ve continuamente contrarrestada por el movimiento térmico, el cual induce una orientación aleatoria. El efecto de esta inducción es en realidad solamente una ligera preferencia por los ángulos agudos, y no por los obtusos, entre los ejes dipolares y el campo. Aunque los átomos individuales cambien su orientación incesantemente, producen en promedio (debido a su enorme cantidad) una constante pequeña preponderancia de la orientación en dirección del campo y en proporción a éste (figura IV.1). Esta ingeniosa explicación es obra del físico francés P. Langevin. Puede comprobarse de la siguiente manera. Si la débil magnetización que se observa es realmente el resultado de tendencias rivales, a saber, la del campo magnético, que tiende a alinear paralelamente las moléculas, y la del movimiento térmico, que induce la orientación aleatoria, entonces debería ser posible incrementar la magnetización mediante la disminución de la temperatura, en vez del reforzamiento del campo. Tal cosa se confirma experimentalmente haciendo que la magnetización sea inversamente proporcional a la temperatura absoluta, en conformidad cuantitativa con la teoría (la ley de Curie). Los aparatos modernos nos permiten reducir, al bajar la temperatura, el movimiento térmico hasta un nivel insignificante que le permite a la tendencia orientadora del campo magnético imponerse, al menos lo suficien-

⁵ Por ser más sencillo, se elige un gas en vez de un cuerpo sólido o líquido; el hecho de que la magnetización sea sumamente débil en este caso no afecta las consideraciones teóricas.

FIGURA IV.1. *Paramagnetismo.*

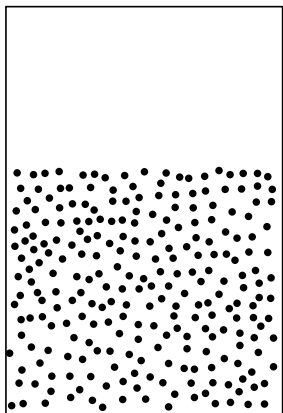
te como para producir una fracción sustancial de “magnetización total”. En este caso ya no esperamos que la duplicación de la potencia del campo duplique la magnetización, sino que esta última aumentará cada vez menos con el reforzamiento del campo, acercándose a lo que se denomina la “saturación”. Esta previsión también se puede confirmar cuantitativamente mediante la experimentación.

Es notable que este comportamiento dependa enteramente del gran número de moléculas que cooperan entre sí para producir la magnetización observable. De otra manera, ésta no sería en absoluto constante, sino que al fluctuar muy irregularmente de un momento al otro, daría testimonio de las vicisitudes de la competencia entre el movimiento térmico y el campo.

SEGUNDO EJEMPLO (MOVIMIENTO BROWNIANO, DIFUSIÓN)

Si uno llena la mitad inferior de un recipiente de vidrio cerrado con una niebla de diminutas gotas encontrará que el borde superior de la niebla gradualmente desciende a una velocidad bien definida, determinada por la viscosidad del aire y por la dimensión y la gravedad específica de las gotas. Pero si observa una de las gotas con el microscopio encuentra que no desciende permanentemente a velocidad constante, sino que realiza un movimiento muy irregular, llamado movimiento browniano, que sólo se corresponde en promedio con el descenso regular.

Ahora, estas gotas diminutas no son átomos, pero son lo suficientemente pequeñas como para no ser totalmente insensibles al impacto de una de esas moléculas que golpean su superficie con impactos perpetuos. Por lo tanto, son desviadas de un lado a otro y sólo pueden obedecer a la influencia de la gravedad en promedio (figuras IV.2 y IV.3).

FIGURA IV.2. *Niebla descendente.*FIGURA IV.3.
*Movimiento
browniano de una
gota descendente.*

Este ejemplo muestra las curiosas experiencias que tendríamos si nuestros sentidos fueran sensibles al impacto de tan sólo unas cuantas moléculas. Existen bacterias y otros organismos mínimos que se ven muy afectados por este fenómeno. Sus movimientos están determinados por los caprichos térmicos del entorno; no son capaces de contrarrestarlos. Si tuvieran una locomoción propia podrían acaso lograr desplazarse de un lugar a otro, aunque con cierta dificultad, pues el movimiento térmico los sacude como si fueran una lancha en medio de una marejada.

Un fenómeno muy parecido al del movimiento browniano es el de la *difusión*. Imagínese un recipiente lleno de un líquido, digamos de agua, con una pequeña cantidad de sustancia colorante, por ejemplo, potasio permanganato, disuelta en el líquido, no con una concentración uniforme, sino más bien como en la figura IV.4, donde los puntos indican las moléculas de la sustancia disuelta y donde la concentración disminuye de izquierda a derecha. Si se deja la sustancia reposar, tiene lugar un muy lento proceso de “difusión”, al extenderse el permanganato de izquierda a derecha, es decir, de los lugares de mayor concentración a los de menor concentración, hasta que se halla uniformemente distribuido en el agua.

El hecho notable de este sencillo y al parecer no particularmente interesante proceso es que no se deriva, como uno pudiera pensar, de ninguna tendencia o fuerza que impulse las moléculas de permanganato desde la zona más poblada hasta la menos poblada, así como la población de un país se traslada hacia las regiones donde hay más espacio libre. Nada parecido sucede con nuestras moléculas de permanganato. Cada una se comporta muy independientemente de todas las

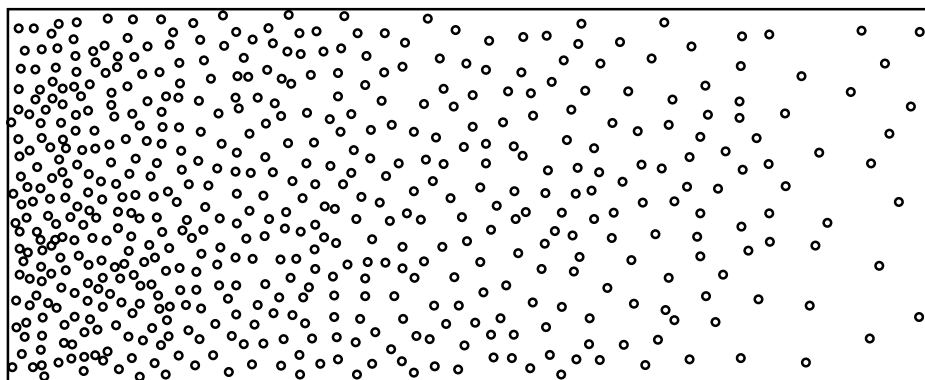


FIGURA IV.4. *Difusión de izquierda a derecha en una solución de concentración variable.*

demás, con las cuales casi nunca se encuentra. Cada una, ya sea en una zona poblada o en una vacía, experimenta la fatalidad de ser continuamente sacudida de un lado a otro por los impactos de las moléculas de agua, desplazándose por este motivo en una dirección impredecible, a veces hacia las concentraciones mayores, a veces hacia las menores, a veces oblicuamente. Este tipo de movimiento con frecuencia ha sido comparado con el de una persona con los ojos vendados en una gran superficie. Aunque impulsada por el deseo de “caminar”, esa persona no muestra preferencia por una dirección en particular y por lo tanto cambia su trayecto continuamente.

El hecho de que ese desplazamiento aleatorio de las moléculas de permanganato, siendo igual en todas ellas, sin embargo produzca un flujo regular hacia la concentración menor y finalmente una uniformidad en la distribución, es a primera vista desconcertante —pero sólo a primera vista—. Si se examina, en la figura IV.4, el aspecto de varias secciones angostas con una concentración aproximadamente constante, las moléculas de permanganato contenidas en una sección en particular serán —gracias a su movimiento aleatorio, ciertamente— desplazadas con igual probabilidad hacia la derecha o hacia la izquierda. Pero precisamente como consecuencia de esto, un plano que separe a dos secciones vecinas será atravesado por más moléculas que provienen del lado izquierdo, que por las que provienen del lado contrario, simplemente porque en el izquierdo hay más moléculas que en el derecho moviéndose aleatoriamente. Y mientras esto sea así, el resultado se mostrará como un flujo regular desde la izquierda hacia la derecha, hasta alcanzar una distribución uniforme.

Cuando estas consideraciones se traducen a un idioma matemático la ley exacta de la difusión se expresa en la forma de una ecuación diferencial

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = D \nabla^2 \rho,$$

con cuya explicación no pienso alterar al lector, aunque en lenguaje ordinario sea bastante sencillo su significado.⁶ La razón de haber mencionado aquí la ley “matemáticamente exacta” es para hacer hincapié en el hecho de que su exactitud física, sin embargo, debe ser cuestionada en cada una de sus aplicaciones. Puesto que se basa en la pura aleatoriedad, su validez es tan sólo aproximativa. Si efectivamente representa, por regla general, una muy buena aproximación, sólo se debe a la enorme cantidad de moléculas que participan en el fenómeno. Mientras más decrece su número, más serán las desviaciones fortuitas que debemos esperar —y éstas son observables en circunstancias favorables—.

TERCER EJEMPLO

(LÍMITES DE LA PRECISIÓN DE LA MEDICIÓN)

El último ejemplo que daremos es bastante similar al segundo, pero tiene singular interés. Los físicos con frecuencia utilizan un cuerpo ligero, suspendido en equilibrio mediante una larga, delgada fibra, para medir las fuerzas débiles que alteran su posición equilibrada mediante la aplicación de fuerzas eléctricas, magnéticas o gravitacionales que lo hacen girar en torno al eje vertical. (El cuerpo ligero, claro es, debe elegirse apropiadamente para el propósito deseado.) El esfuerzo continuo por mejorar la precisión de este muy comúnmente utilizado dispositivo de “equilibrio torsional” se ha topado con un curioso límite, en sí mismo muy interesante. Al optar por cuerpos cada vez más ligeros y fibras más finas y más largas —a fin de hacer que el equilibrio sea sensible a fuerzas cada vez más tenues— se llegó al límite donde el cuerpo suspendido se hizo notablemente sensible a los impactos del movimiento térmico de las moléculas del entorno, empezando a realizar una incesante, irregular “danza” alrededor de su po-

⁶ A saber, la concentración en cualquier punto dado aumenta (o decrece) en un grado temporal proporcional a la concentración relativamente excedente (o deficiente) en su medio ambiente infinitesimal. Por cierto, la ley de la conducción térmica es de la misma forma exactamente, remplazando la “concentración” por “temperatura”.

sición de equilibrio, muy similar al temblor de la gota minúscula del segundo ejemplo. Aunque este comportamiento no determina un límite absoluto en la precisión de las medidas obtenidas con el equilibrio torsional, sí determina un límite práctico. El efecto incontrolable del movimiento térmico compite con el efecto de la fuerza que se quiere medir y hace insignificante la deflexión que se ha detectado. Es necesario multiplicar las observaciones a fin de eliminar el efecto del movimiento browniano en el instrumento utilizado. Creo que este ejemplo es particularmente iluminador en nuestra actual investigación. Pues nuestros órganos sensoriales, al fin al cabo, son una especie de instrumento. Podemos ver lo inútiles que serían si fueran demasiado sensibles.

LA REGLA $\sqrt{N}$

Hemos terminado con los ejemplos, por ahora. Únicamente añadiré que no existe una sola ley de la física o la química, entre aquellas que dentro de un organismo o en sus interacciones con su medio ambiente sean significativas, que no podría utilizar como un ejemplo. Podría ser más compleja la explicación minuciosa, pero el punto principal siempre sería el mismo y por lo tanto su descripción se volvería monótona.

Pero me gustaría añadir una afirmación cuantitativa muy importante en relación con el grado de imprecisión que se puede esperar de cualquier ley física, la llamada ley $\sqrt{n}$. Primero la ilustraré con un sencillo ejemplo, para luego generalizarla.

Si yo les dijera que cierto gas, en ciertas condiciones de presión y temperatura, posee cierto grado de densidad, y si lo expresara diciendo que dentro de cierto volumen (de una dimensión adecuada para algún experimento) existen bajo tales condiciones sólo n moléculas del gas, entonces ustedes podrían estar seguros de que si pusieran a prueba mi afirmación en un momento particular del tiempo, la encontrarían imprecisa, siendo la divergencia del orden de $\sqrt{n}$. Así, si $n = 100$, encontrarían una divergencia de aproximadamente 10, por lo que el error relativo = 10%. Pero si $n = 1$ millón, probablemente ustedes encontrarían una divergencia de aproximadamente 1000, por lo que el error relativo = 1/1000. Ahora bien, *grosso modo*, esta ley estadística es bastante general. Las leyes de la física y la química física son imprecisas con un probable error relativo del orden de $1/\sqrt{n}$, donde n es el número de moléculas que cooperan entre sí para dar lugar a esa ley, es decir, para producir su validez dentro de las regiones del espacio o del tiempo (o de ambos) que son pertinentes respecto a ciertas consideraciones o cierto experimento.

En lo anterior se puede ver nuevamente que un organismo debe tener una estructura más o menos grande para beneficiarse de leyes aproximadamente precisas, tanto en el ámbito de su vida interna como en su interacción con el mundo externo. Porque de no ser así, el número de partículas participantes sería demasiado reducido, y la ley demasiado imprecisa. El elemento particularmente exigente es la raíz cuadrada. Pues aunque un millón es un número razonablemente grande, una precisión de solo 1 en 1 000 no es extraordinariamente buena, cuando una norma aspira a la distinción de ser una “ley de la naturaleza”.

LA IDEA GENERAL DE LA SUSTANCIA HEREDITARIA

Surge en estos hechos una muy sencilla respuesta a nuestra pregunta, a saber: ¿son capaces estas estructuras, formadas por una cantidad relativamente pequeña de átomos, de soportar durante largos periodos la influencia perturbadora del movimiento térmico a la cual está continuamente expuesta la sustancia hereditaria? Supongamos que la estructura de un gen sea la de una enorme molécula capaz únicamente de experimentar un cambio discontinuo, el cual consistiría en el reordenamiento de los átomos y que produciría una molécula isométrica.⁷ El reordenamiento podría afectar únicamente un área pequeña del gen, y sería posible un gran número de diversos reordenamientos. Los umbrales de energía que separan las configuraciones dadas de cualesquier otras configuraciones isométricas posibles tienen que ser lo suficientemente altos (comparados con la energía termal promedio de un átomo) como para que la transformación sea un suceso raro. Haremos de identificar estos sucesos raros con las mutaciones espontáneas.

La parte final de este capítulo se dedicará a poner a prueba esta idea general del gen y de la mutación (nociones debidas principalmente al físico alemán M. Delbrück) mediante su comparación detallada con los datos genéticos. Antes de hacerlo, resultará adecuado que comentemos los fundamentos y el carácter general de la teoría.

LA SINGULARIDAD DE LA IDEA

¿Fue absolutamente esencial que el planteamiento biológico pusiera al descubrimiento las raíces más profundas de la idea y las basara en la mecánica cuántica? La

⁷ La seguiré llamando, por conveniencia, “transición isomérica”, aunque sería absurdo excluir la posibilidad de cualquier intercambio con el entorno.

conjetura de que un gen es una molécula me atrevo a decir que es hoy un lugar común. Pocos biólogos, ya sea que estén o no familiarizados con la teoría cuántica, no estarían de acuerdo al respecto. En § 32⁸ nos atrevimos a atribuírsela a un físico precuántico, como la única explicación razonable de la permanencia observada. Las subsecuentes consideraciones sobre el isomorfismo, el umbral de energía, el papel sobresaliente de la proporción $W: kT$ en la determinación de la probabilidad de una transición isométrica, todo eso podía muy bien haberse planteado sobre la base del empirismo puro, en todo caso sin apoyarse explícitamente en la teoría cuántica. ¿Por qué he insistido tanto en el punto de vista cuántico-mecánico, aunque no haya podido esclarecerlo cabalmente en este pequeño libro, y muy posiblemente haya aburrido a más de un lector?

La mecánica cuántica es la primera perspectiva teórica que explica, partiendo de los primeros principios, todos los tipos de agregaciones de átomos que se encuentran realmente en la naturaleza. El modelo de enlace Heitler-London es un aspecto excepcional y singular de la teoría, que no fue inventado con el propósito de explicar la vinculación química. Se introduce por sí mismo en una forma interesantísima y enigmática, imponiéndose a nosotros por consideraciones enteramente distintas. Resulta que se corresponde exactamente con los datos químicos observados, y, como dije, es un aspecto excepcional que se ha analizado exhaustivamente, pudiendo afirmarse con razonable certidumbre que “una cosa así no podría suceder de nuevo” en el futuro desarrollo de la teoría cuántica.

En consecuencia, podemos aseverar con seguridad que no existe una alternativa a la explicación molecular de la sustancia hereditaria. La permanencia del aspecto físico no se puede explicar de ningún otro modo. Si la noción Delbrück fracasara, tendríamos que abandonar todos los intentos explicativos sucesivos. Es éste el primer punto que quiero establecer.

ALGUNAS IDEAS TRADICIONALES ERRÓNEAS

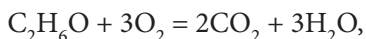
Pero podría preguntarse: ¿con excepción de las moléculas, en verdad no hay otras estructuras perdurables compuestas por átomos? ¿No preserva los rasgos de la figura en ella estampada una moneda de oro enterrada en una tumba durante un par de miles de años? Es verdad que la moneda se compone de una cantidad enorme de átomos, pero seguramente en este caso no estamos dispuestos a atri-

⁸ Este apartado no se reproduce en la presente edición. [Comps.]

buir la mera preservación de su forma a las estadísticas de los grandes números. La misma observación podría aplicarse a un bonito grupo de cristales que encontramos incrustado en una roca, donde debió de haber permanecido sin cambiar durante periodos geológicos.

Lo anterior nos conduce al segundo punto que deseo elucidar. Los casos de una molécula, un sólido, un cristal, no son realmente diferentes. A la luz de los presentes conocimientos, son virtualmente iguales. Desgraciadamente, la enseñanza escolar sigue manteniendo ciertas ideas tradicionales que caducaron hace muchos años y que oscurecen el actual estado de las cosas.

Efectivamente, lo que hemos aprendido en la escuela acerca de las moléculas no nos proporciona la idea de que se relacionan más estrechamente con el estado sólido que con el líquido o gaseoso. Por el contrario, nos han enseñado a distinguir cuidadosamente entre un cambio físico, tal como la fusión o la evaporación, donde las moléculas se preservan (de manera que, por ejemplo, el alcohol, ya sea en la forma de un sólido, un líquido, o un gas, se compone de las mismas moléculas, C_2H_6O), y un cambio químico, como por ejemplo, la combustión del alcohol,



donde una molécula de alcohol y tres moléculas de oxígeno experimentan una reordenación, formando dos moléculas de dióxido de carbono y tres moléculas de agua.

Sobre los cristales, se nos ha enseñado que forman mallas periódicas triples, en las cuales la estructura de una molécula individual es a veces reconocible, como sucede con el alcohol y la mayoría de los compuestos orgánicos, mientras que en otros cristales, por ejemplo la sal de roca ($NaCl$), las moléculas de $NaCl$ no pueden ser delimitadas inequívocamente, ya que cada átomo de Na se encuentra rodeado por seis átomos de Cl , y viceversa, de manera que es bastante arbitraria la consideración de cuáles pares, si alguno, forman patrones moleculares.

Finalmente, se nos ha dicho que un sólido puede ser o no ser cristalino, y en este último caso lo llamamos amorfo.

DIFERENTES "ESTADOS" DE LA MATERIA

Ahora, yo no iría tan lejos como para decir que todas estas afirmaciones y distinciones son erróneas totalmente. A veces son útiles en la práctica. Pero los límites

del verdadero aspecto de la estructura de la materia deben establecerse de un modo enteramente distinto. La distinción fundamental se encuentra entre las dos líneas del siguiente esquema de “ecuaciones”:

$$\begin{aligned} \text{molécula} &= \text{sólido} = \text{cristal}, \\ \text{gas} &= \text{líquido} = \text{amorfo}. \end{aligned}$$

Debemos explicar estas afirmaciones brevemente. Los llamados cristales amorfos no son realmente amorfos o realmente sólidos. Los rayos X han revelado la estructura rudimentaria del cristal de grafito en la fibra de carbón “amorfa”. Así, el carbón es un sólido, pero es cristalino también. Allí donde no encontramos una estructura cristalina, tenemos que ver la sustancia como un líquido de gran “viscosidad” (fricción interna). Tal sustancia muestra, por la ausencia de una temperatura de fusión bien definida y de una temperatura latente de fusión, que no es un verdadero sólido. Al ser calentado, se suaviza gradualmente y finalmente se licua sin discontinuidad. (Recuerdo que al final de la primera Guerra Mundial, en Viena nos repartieron una sustancia parecida al asfalto como sustituto del café. Era tan dura que uno tenía que usar un cincel o un hacha para romper en pedacitos el pequeño ladrillo, el cual mostraba cortes lisos, como de nácar. Sin embargo, al cabo del tiempo, se comportaba como un líquido que si por error se dejaba en un recipiente, al cabo de un par de días se solidificaba en el fondo.)

La continuidad del estado gaseoso y del líquido es un asunto bien conocido. Uno puede licuar cualquier gas sin discontinuidad mediante un “rodeo” del llamado punto crítico. Pero no abordaremos esta cuestión aquí.

LA DISTINCIÓN QUE REALMENTE IMPORTA

De esta manera hemos justificado todo lo que aparece en el anterior esquema de “ecuaciones”, con la excepción del punto principal, a saber, que queremos se considere una molécula como un sólido = cristal.

La razón de esto es que los átomos que forman una molécula, ya sean pocos o muchos, se unen por fuerzas de exactamente la misma naturaleza que la de los numerosos átomos que edifican un verdadero sólido, un cristal. La molécula presenta la misma solidez de estructura que posee un cristal. ¡Recuerden ustedes que precisamente en esta solidez nos apoyamos para explicar la permanencia de un gen!

La distinción realmente importante en la estructura de la materia reside en si

los átomos están ligados o no por aquellas solidificadoras fuerzas Heitler-London. Todos los átomos de un sólido y de una molécula sí lo están. En un gas de átomos individuales (por ejemplo, el vapor de mercurio) no lo están. En un gas compuesto de moléculas, tan sólo los átomos dentro de cada molécula se vinculan así.

EL SÓLIDO APERIÓDICO

Podría calificarse a una molécula pequeña como “germen de un sólido”. A partir de un germen sólido tan pequeño, existen al parecer dos formas de edificar asociaciones cada vez más grandes. Una es la relativamente monótona forma de repetir la misma estructura en tres direcciones una y otra vez. Ésta es la forma en que crece un cristal. Una vez que la periodicidad se establece, no existe un límite definitivo al tamaño de la agregación. La otra forma consiste en edificar agregaciones cada vez más extensas sin el monótono recurso de la repetición. Es éste el caso en la cada vez más compleja molécula orgánica, en que cada átomo, y cada grupo de átomos, tienen un papel individual, no enteramente equivalente al de muchos otros (como es el caso en una estructura periódica). Bien podríamos llamarlo un cristal aperiódico o sólido y expresar nuestra hipótesis diciendo: pensamos que un gen —o acaso toda la fibra cromosómica—⁹ es un sólido aperiódico.

LA DIVERSIDAD DE CONTEXTOS COMPRIMIDA EN EL CÓDIGO MINIATURA

Ha sido frecuente la pregunta de que cómo es posible que esa minúscula mota de materia, el núcleo del huevo fertilizado, pueda contener un complejo código-guión del desarrollo futuro de un organismo. Una asociación bien ordenada de átomos, provista de la suficiente resistencia para mantener su ordenamiento permanentemente, es al parecer la única estructura material concebible que pueda ofrecer una diversidad de posibles arreglos (“isométricos”) lo suficientemente grande como para incorporar un complejo sistema de “determinaciones” dentro de límites espaciales mínimos. De hecho, la cantidad de átomos en tal estructura no tiene que ser muy grande para producir un número casi ilimitado de posibles ordenamientos. Podemos ver en el código Morse una ilustración del fenómeno.

⁹ No constituye una objeción el hecho de que sea extremadamente flexible; también lo es un alambre fino de cobre.

Dos signos distintos, el punto y la raya, en grupos bien ordenados de no más de cuatro elementos, permiten 30 especificaciones diferentes. Ahora, si uno se permitiera el uso de un tercer signo, además del punto y la raya, y utilizara grupos de no más de 10, se podrían formar 29 524 “letras” diferentes; con cinco signos, y grupos de hasta 25, el resultado es 372 529 029 846 191 405.

Se puede objetar que el ejemplo resulta deficiente, ya que nuestros signos de morse pueden tener una composición diferente (por ejemplo, $\bullet - -$ y $\bullet \bullet -$), y por lo tanto no resulta ser una analogía adecuada del isomorfismo. A fin de remediar este defecto, escojamos, como tercer ejemplo, sólo las combinaciones de 25 símbolos exactamente y sólo aquellas que contengan cinco de los supuestos cinco tipos (cinco puntos, cinco rayas, etc.). Un cálculo aproximado nos proporciona 62 330 000 000 000 combinaciones, donde los ceros representan las cifras que no me he molestado en calcular.

Claro es que, en el caso presente, de ningún modo “cada” ordenamiento del grupo de átomos representa una posible molécula; más aún, no se trata de un código que se deba aceptar arbitrariamente, pues el código-guión tiene que ser en sí mismo el factor operante que da lugar al desarrollo. Pero, por otra parte, el número elegido en el ejemplo (25) es realmente muy pequeño, y sólo hemos considerado la ordenación linear simple. No obstante, únicamente queremos demostrar que en la idea molecular del gen ya no es inconcebible que el código miniatura deba corresponderse precisamente con un plan de desarrollo muy complejo y específico y deba de algún modo contener los medios para ponerlo en marcha.

COMPARACIÓN CON LOS HECHOS: GRADO DE ESTABILIDAD; DISCONTINUIDAD DE LAS MUTACIONES

Procedamos finalmente a comparar la idea teórica con los hechos biológicos. Es obvio que la primera pregunta es que si ésta puede realmente explicar el alto grado de permanencia que se observa. ¿Son razonables las evaluaciones del umbral térmico requerido: un alto múltiplo de la energía térmica promedio kT ? ¿Se encuentran dentro del rango conocido por la química común? Esta pregunta es trivial; puede responderse afirmativamente sin examinar las tablas. Las moléculas de cualquier sustancia que un químico pueda aislar a cualquier temperatura dada deben tener a esa temperatura un tiempo de vida de por lo menos unos cuantos minutos. (Es éste un cálculo mínimo, pues suele ser mucho más largo.) Así, los umbrales térmicos que un químico encuentra son necesaria y precisamente del orden de la magnitud

requerida para explicar prácticamente cualquier grado de permanencia que un biólogo encuentre; pues de § 36¹⁰ recordamos que los umbrales térmicos que varían dentro de un rango de aproximadamente 1:2 determinan tiempos de vida que fluctúan entre una fracción de segundo y decenas de miles de años.

Pero permítanme ustedes mencionar cifras, como referencia futura. Las proporciones W/kT mencionadas como ejemplo en § 36, a saber,

$$\frac{W}{kT} = 30, 50, 60,$$

que producen tiempos de vida de

$$\frac{1}{10} \text{ segundos, 16 meses, 30 000 años,}$$

respectivamente, se corresponden, a una temperatura ambiental, con los umbrales térmicos de

$$0.9, 1.5, 1.8 \text{ electronvoltios.}$$

Tenemos que explicar qué es la unidad “electronvoltio”, la cual es muy útil para un físico, ya que se puede visualizar. Por ejemplo, la tercera cifra (1.8) significa que un electrón, acelerado por un voltaje de cerca de dos voltios, adquiriría justo la energía suficiente para efectuar la transición mediante el impacto. (Como comparación, es de tres voltios la batería de una linterna de bolsillo común.)

Las anteriores consideraciones permiten concebir que un cambio isométrico de configuración en alguna parte de nuestra molécula, producido por una fluctuación aleatoria de la energía vibratoria, sea realmente un suceso tan raro como para interpretarse como una mutación espontánea. De esta manera explicamos, mediante los principios mismos de la mecánica cuántica, el hecho más sorprendente de las mutaciones, el que primero atrajo la atención de Vries, a saber, que éstas son variaciones que “saltan” sin que aparezcan formas intermedias.

LA ESTABILIDAD DE LOS GENES NATURALMENTE SELECCIONADOS

Habiendo descubierto el aumento en el grado natural de mutación mediante cualquier tipo de rayos ionizantes, se podría pensar en atribuirle el grado natural

¹⁰ Este apartado no se reproduce en la presente edición. [Comps.]

a la radiactividad del suelo y el aire y a la radiación cósmica. Pero una comparación cuantitativa con los resultados de los rayos X muestra que la “radiación natural” es demasiado débil y sólo podría explicar una pequeña fracción del grado natural.

Si aceptamos que las raras mutaciones naturales se deben a la influencia de las aleatorias fluctuaciones del movimiento térmico, no nos debe sorprender demasiado que la Naturaleza haya tenido éxito en hacer una elección tan sutil de los umbrales térmicos que se requieren para que la mutación sea tan rara. Pues en las lecciones anteriores hemos llegado a la conclusión de que las mutaciones frecuentes son perjudiciales en la evolución. Los individuos que gracias a la mutación adquieren una configuración genética de insuficiente estabilidad, pocas posibilidades tendrán de ver a su “ultrarradical” descendencia, producto de las rápidas mutaciones, sobrevivir mucho tiempo. Su especie se verá liberada de ellas y podrá reunir genes estables mediante la selección natural.

LA ESTABILIDAD A VECES MÁS BAJA DE LOS MUTANTES

Pero, claro es, en lo que concierne a los mutantes que creamos en nuestros experimentos de reproducción y que seleccionamos, *qua* mutantes, a fin de estudiar a sus vástagos, no hay ninguna razón para esperar que todos deban mostrar una estabilidad muy alta. Pues no han sido sometidos “a prueba”, o, si lo han sido, fueron “desechados” en las especies salvajes, posiblemente por causa de su mutabilidad demasiado alta. En todo caso, no nos sorprende en absoluto descubrir que algunos de estos mutantes efectivamente muestran una mutabilidad mucho mayor que la de los genes “silvestres” normales.

LA INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA ES MENOR EN LOS GENES INESTABLES QUE EN LOS ESTABLES

Lo anterior nos permite poner a prueba nuestra fórmula de la mutabilidad; a saber,

$$t = \tau e^{W/kT}.$$

(Recordemos que t es el tiempo previsto para una mutación con un umbral de energía W .) Nos preguntamos: ¿cómo cambia t con la temperatura? Mediante

esta fórmula podemos encontrar fácilmente el valor aproximado de la proporción entre el valor t a una temperatura $T + 10$, y la temperatura T

$$\frac{t_T + 10}{t_T} = e^{-10W/kT^2}$$

Siendo el exponente negativo ahora, la proporción es, naturalmente, menos que 1. El tiempo previsto disminuye con el aumento de la temperatura y la mutabilidad aumenta. Ahora bien, esto se puede probar y ha sido probado con la mosca *Drosophila*, dentro del rango de temperatura que estos insectos pueden soportar. El resultado fue, a primera vista, sorprendente. La *baja* mutabilidad de los genes silvestres aumentó apreciablemente, pero la comparativamente *alta* mutabilidad que se daba en los genes ya mutados no aumentó, o en todo caso aumentó mucho menos. Es esto lo que podemos esperar al comparar nuestras dos fórmulas. Un valor grande de W/kT , que según la primera fórmula se requiere para hacer que t sea mayor (gen estable), proporcionará, de acuerdo con la segunda, un valor menor de la proporción allí evaluada, es decir, un aumento considerable de la mutabilidad con temperatura. (Los valores reales de la proporción parecen yacer entre un medio y un quinto. El valor recíproco, 2.5, es lo que en una reacción química ordinaria llamamos el factor Van't Hoff.)

CÓMO PRODUCEN LA MUTACIÓN LOS RAYOS X

Volviendo ahora al grado de mutación inducida por los rayos X, ya inferimos mediante los experimentos de reproducción, primero (a partir de la proporcionalidad del grado de mutación y de la energía total de la ionización), que algún factor individual produce la mutación; segundo (a partir de los resultados cuantitativos y del hecho de que el grado de mutación se determina por la densidad de la ionización, independientemente de la longitud de onda), este factor individual tiene que ser una ionización, o proceso similar, que tiene que ocurrir dentro de cierto volumen de tan sólo aproximadamente 10 distancias-atómicas-al cubo, a fin de producir una mutación especificada. De acuerdo con nuestro esquema, la energía necesaria para superar el umbral obviamente debe ser producida por ese proceso parecido a una explosión, ya sea la ionización o la excitación. Digo que es parecido a una explosión porque la energía utilizada en una ionización (utilizada, por cierto, no por el rayo X mismo, sino por el electrón secundario que éste produce) ha sido bien determinada y alcanza la cantidad comparativamente enorme de 30

electronvoltios. Esta energía se ha de convertir, alrededor del punto donde se dispara, en un movimiento térmico enormemente acrecentado, extendiéndose desde allí en la forma de una “onda térmica”, una onda producida por las intensas oscilaciones de los átomos. No es inconcebible el hecho de que esta onda térmica pueda ser capaz de proporcionar el umbral de energía de uno o dos electronvoltios dentro de un “rango de acción” de aproximadamente 10 distancias atómicas, aunque bien pudiera ser que un físico sin prejuicios hubiera anticipado un rango de acción ligeramente menor. El hecho de que en muchos casos el efecto de la explosión no producirá una transición isométrica ordenada, sino una lesión en el cromosoma, una lesión que se convierte en letal cuando, mediante ingeniosos cruzamientos, se retira la pareja no lesionada y se sustituye con una pareja cuyo gen correspondiente se sabe que es mórbido él mismo; todo esto es algo que se debe esperar que suceda, siendo exactamente lo que se comprueba.

SU EFICIENCIA NO DEPENDE DE LA MUTABILIDAD ESPONTÁNEA

Son muchos los aspectos que son, si no predecibles por el esquema, fácilmente comprensibles gracias a éste. Por ejemplo, un mutante inestable no muestra en promedio un grado de mutación por rayos X mayor que la de un mutante estable. Ahora, con una explosión que proporcionara una energía de 30 electronvoltios, ciertamente no se podría esperar que fuera mucha la diferencia si el umbral de energía fuera un poco mayor o un poco menor, digamos 1 o 1.3 voltios.

MUTACIONES REVERSIBLES

En algunos casos la transición fue estudiada en ambos sentidos, digamos que desde un gen “silvestre” hasta un mutante especificado, y luego desde éste al gen silvestre. En tales casos, el grado de mutación natural es a veces casi el mismo, a veces muy distinto. A primera vista uno queda intrigado, porque el umbral que hay que superar parece ser el mismo en ambos casos. Pero es claro que no tiene que serlo, puesto que hay que medirlo desde el nivel de energía de la configuración inicial, y ésta puede ser distinta en el gen silvestre y en el gen mutado.

En términos generales, creo que el “modelo” Delbrück pasa las pruebas adecuadamente y que podemos usarlo justificadamente en consideraciones subsecuentes.

UNA NOTABLE CONCLUSIÓN GENERAL
A PARTIR DEL MODELO

Permítanme referirme a la última frase de § 46,¹¹ donde yo intenté explicar que la idea molecular del gen hacía que fuera por lo menos concebible que “el código miniatura debería tener una correspondencia de uno-a-uno con un plan de desarrollo complejo y especificado, y de alguna manera contener los medios para ponerlo en funcionamiento”. Muy bien, pero ¿cómo logra hacerlo? ¿cómo podemos convertir lo “concebible” en verdadera comprensión?

El modelo molecular de Delbrück, en su generalidad total, no parece contener el más ligero indicio de cómo funciona la sustancia hereditaria. De hecho, yo no creo que sea probable que la física en un futuro cercano nos dé cualquier información detallada sobre esta cuestión. Ha habido algunos avances y estoy seguro de que los seguirá habiendo en el campo de la bioquímica bajo la tutela de la fisiología y de la genética.

Ninguna información detallada sobre el funcionamiento del mecanismo genético puede surgir de una descripción tan general como la que se ha dado antes. Esto es obvio. Pero, aunque parezca extraño, se puede obtener a partir de ella una sola conclusión general, y he de confesar que éste fue mi único motivo para escribir este libro.

Del esquema general de la sustancia hereditaria creado por Delbrück resulta que la materia viviente, aunque no elude las “leyes de la física” hasta la fecha establecidas, probablemente implica “otras leyes de la física” todavía desconocidas, las cuales, sin embargo, una vez que se hayan revelado, constituirán una parte tan integral de esta ciencia como las primeras.

EL ORDEN BASADO EN EL ORDEN

Es ésta una línea de pensamiento bastante sutil que en más de un aspecto se puede malentender. Las páginas restantes se ocupan en esclarecerla. En las siguientes consideraciones se expone una elucidación preliminar que, a pesar de ser algo tosca, no es totalmente errónea.

Ya se ha explicado en el capítulo 1 que las leyes de la física, tal como las cono-

¹¹ En esta edición, bajo el título “La diversidad de contextos comprimida en el código miniatura”.

ceмос, son leyes estadísticas.¹² Tienen mucho que ver con la natural tendencia en las cosas a caer en el desorden.

Pero, a fin de reconciliar la alta durabilidad de la sustancia hereditaria con su diminuta dimensión, tuvimos que eludir la tendencia al desorden “inventando la molécula”, de hecho, una molécula inusualmente grande que sin duda es una obra maestra del orden altamente diferenciado, resguardado por la varita mágica de la teoría cuántica. Las leyes de la aleatoriedad no se invalidan por esta “invención”, pero su efecto final se modifica. Los físicos están familiarizados con el hecho de que la teoría cuántica modifica las leyes clásicas de la física, especialmente a bajas temperaturas. Hay muchos casos al respecto. Uno de ellos, particularmente notable, es al parecer la vida. La vida es aparentemente el comportamiento ordenado y prescrito de la materia, no basado exclusivamente en su tendencia a pasar del orden al desorden, sino parcialmente en el mantenimiento del orden existente.

Yo podría esperar aclararle mi punto de vista a un físico —pero sólo a un físico—, diciendo: el organismo viviente es al parecer un sistema macroscópico que en una parte de su comportamiento tiende a adoptar esa conducta puramente mecánica (en contraste con la termodinámica) a la cual todos los sistemas se aproximan cuando la temperatura se acerca al cero absoluto y el desorden molecular es eliminado.

A alguien que no sea un físico le resulta difícil creer que las leyes ordinarias de la física que ve como el prototipo de la precisión inviolable, en verdad se basan en la tendencia estadística de la materia a caer en el desorden. He dado algunos ejemplos al respecto en el capítulo I.¹³ El principio general involucrado es la famosa segunda ley de la termodinámica (el principio de la entropía) y su igualmente célebre fundamento estadístico. En §§ 56-60¹⁴ intentaré esbozar la influencia del principio de entropía en el comportamiento macroscópico de un organismo viviente, olvidando en ese momento todo lo que se sabe sobre los cromosomas, la herencia, y lo demás.

¹² Afirmar esto de manera totalmente general respecto a “las leyes de la física” es acaso discutible. El tema se discutirá en el capítulo IV. [A partir del apartado “Las nuevas leyes que podemos esperar en el organismo” (p. 144) de esta edición. (E.)]

¹³ Apartados “Índole y propósito de la investigación” (p. 115) hasta “La regla $\sqrt{n}$ ” (p. 127) de la presente edición. [Comps.]

¹⁴ Apartados “La materia viviente elude decaer y llegar al equilibrio” (p. 140) hasta “La organización se mantiene extrayendo el “orden” del medio ambiente” (p. 143) de la presente edición. [Comps.]

LA MATERIA VIVIENTE ELUDE DECAER
Y LLEGAR AL EQUILIBRIO

¿Cuál es el rasgo característico de la vida? ¿En qué momento se considera que una porción de materia vive? Cuando persiste en “hacer algo”, en moverse, en intercambiar cosas con su medio ambiente, etc., y durante un periodo mucho más largo de lo que pudiéramos esperar que una porción de materia inanimada “siguiera funcionando” en circunstancias similares. Cuando un sistema que no está vivo se aísla o se coloca en un ambiente uniforme, su movimiento usualmente cesa muy pronto como resultado de diversos tipos de fricción; las diferencias en el potencial eléctrico o químico quedan igualadas, las sustancias que tienden a formar un compuesto químico lo hacen, la conducción del calor uniforma las temperaturas. Subsecuentemente, el sistema entero pierde su vitalidad, mostrándose como un cacho de materia muerto, inerte. Llega a un estado permanente en que no ocurren sucesos observables. Los físicos lo llaman el estado de equilibrio termodinámico o de “máxima entropía”.

En la práctica un estado de este tipo usualmente llega con mucha rapidez. Teóricamente, no es un equilibrio absoluto todavía, y tampoco un máximo verdadero de entropía. Pero la aproximación final al equilibrio es muy lenta. Puede tomar horas, años, siglos... Para dar un ejemplo, uno en que tal aproximación es relativamente rápida: si un vaso lleno de agua pura y otro con agua azucarada se ponen juntos en un lugar herméticamente cerrado y se mantienen a una temperatura constante, al principio parece que nada sucede, que hay un equilibrio total. Pero tras uno o dos días es posible ver que el agua pura, por su mayor presión de vapor, lentamente se evapora, condensándose en la solución azucarada. Ésta se desborda. Sólo después de que el agua pura se ha evaporado totalmente, el azúcar alcanza su objetivo de distribuirse uniformemente en toda el agua líquida existente.

Tales aproximaciones lentas al equilibrio jamás podrían confundirse con la vida, y podemos desecharlas aquí. Me he referido a ellas a fin de absolverme yo mismo del cargo de la imprecisión.

SE ALIMENTA DE “ENTROPÍA NEGATIVA”

Es porque elude decaer rápidamente, llegando al estado inerte del “equilibrio”, que un organismo parece tan enigmático; tanto así, que desde los tiempos más anti-

guos del pensamiento humano se pensó que en el organismo opera una fuerza especial no física o sobrenatural (*vis viva*, la entelequia) —y algunas personas lo siguen pensando—.

¿Cómo evita el decaimiento un organismo viviente? La respuesta obvia es: comiendo, bebiendo, respirando, y (en el caso de las plantas) asimilando. *Metabolismo* es el término técnico. La palabra griega (μεταβάλλειω) significa cambio o intercambio. ¿Intercambio de qué? Originalmente, la idea subyacente fue, sin duda, el intercambio de sustancias (por ejemplo, *Stoffwechsel* es el término en alemán para el metabolismo). Es absurdo que la cosa esencial sea el intercambio de sustancias. Cualquier átomo de nitrógeno, oxígeno, sulfuro, etc., es tan bueno como cualquier otro de su tipo; ¿qué se podría ganar mediante el intercambio? En el pasado, durante un tiempo nuestra curiosidad fue silenciada por las afirmaciones de que nos alimentamos de energía. En algún país muy avanzado (no recuerdo si los Estados Unidos o Alemania, o en ambos) uno podía encontrar en los restaurantes unos menús que indicaban, además del precio, el contenido energético de cada platillo. No es necesario decir que, tomado literalmente, esto es tan absurdo como lo anterior. En un organismo adulto el contenido energético es tan invariable como el contenido material. Puesto que seguramente una caloría vale tanto como cualquier otra, no se puede entender en qué ayudaría un mero intercambio.

¿En qué consiste, pues, esa cosa tan preciosa que nuestros alimentos contienen y que nos mantiene alejados de la muerte? La respuesta es sencilla. Cada proceso, suceso, circunstancia: llámese como usted quiera; en una palabra, todo lo que sucede en la vida significa un aumento de la entropía en el lugar del mundo donde se da. Así, un organismo viviente continuamente aumenta su entropía —o, se podría decir, produce entropía positiva— y de esta manera tiende a aproximarse al estado peligroso de la máxima entropía, que es la muerte. Sólo puede mantenerse a distancia, es decir, vivo, mediante la asimilación continua de la entropía negativa de su medio ambiente —cosa muy positiva, como veremos de inmediato—. Lo que alimenta a un organismo es la entropía negativa. O, para decirlo menos paradójicamente, el factor esencial en el metabolismo es que el organismo logra liberarse de toda la entropía que no puede dejar de producir mientras esté vivo.

¿QUÉ ES LA ENTROPÍA?

¿Qué es la entropía? Permítanme primero enfatizar que no es un concepto vago o una idea imprecisa, sino una cantidad física tan medible como la longitud de una

vara, la temperatura de cualquier parte del cuerpo, el punto de fusión de un cristal dado, o el calor específico de cualquier sustancia dada. En el punto de cero absoluto de la temperatura (aproximadamente, -273°C) la entropía de cualquier sustancia es cero. Cuando uno induce otro estado en la sustancia mediante pequeños pasos lentos y reversibles (incluso si de esta manera su naturaleza física o química cambia o se rompe en dos o más partes de diferente naturaleza física o química) la entropía aumenta en un grado que se calcula dividiendo cada porción de la temperatura que se tuvo que proporcionar en ese procedimiento, por la temperatura absoluta a la que se proporcionó, y finalmente sumando todas estas pequeñas contribuciones. Para dar un ejemplo, cuando uno derrite un sólido, su entropía aumenta en proporción a la temperatura necesaria para la fusión dividida por la temperatura en el punto de fusión. Así, la unidad de medición de la entropía es $\text{cal}/^{\circ}\text{C}$ (del mismo modo que la caloría es la unidad de medición de la temperatura y el centímetro es la de la longitud).

EL SIGNIFICADO ESTADÍSTICO DE LA ENTROPÍA

He mencionado esta definición técnica simplemente para sacar a la entropía del ámbito de vago misterio donde con frecuencia se oculta. Mucho más importante para nosotros es que la entropía se sustenta por el concepto estadístico del orden y el desorden, conexión revelada por las investigaciones de Boltzmann y Gibbs en la física estadística. Ésta también es una conexión cuantitativa exacta, así expresada:

$$\text{entropía} = k \log D,$$

donde k es la llamada constante de Boltzmann ($= 3.2983 \cdot 10^{-24} \text{ cal}/^{\circ}\text{C}$), y D es una medida cuantitativa del desorden atómico de la sustancia dada. Es casi imposible dar una breve, no técnica, explicación exacta de esta cantidad D . El desorden que indica es en parte debido al movimiento térmico, en parte a que diferentes tipos de átomos se mezclan aleatoriamente, en vez de estar separados, como las moléculas de azúcar y de agua en el ejemplo antes citado. La ecuación de Boltzmann queda bien ilustrada mediante este ejemplo. La gradual “difusión” del azúcar en todo el agua disponible incrementa el desorden D , y por lo tanto (ya que el logaritmo de D aumenta con D) la entropía. Es claro que cualquier suministro de calor incrementa el torbellino del movimiento térmico, es decir, al incrementarse D se incrementa la entropía; es particularmente obvio que esto debe ser así cuando

uno derrite un cristal, pues, al hacerlo, uno destruye el pulcro ordenamiento permanente de los átomos o moléculas, convirtiendo la red cristalina en una aleatoria distribución que cambia continuamente.

Un sistema aislado o un sistema en un medio ambiente uniforme (que para las presentes consideraciones entendemos como parte del sistema que examinamos) acrecienta su entropía y más o menos rápidamente se aproximan al estado inerte de la entropía máxima. Hoy vemos esta ley fundamental de la física simplemente como la natural tendencia de las cosas a aproximarse al estado caótico (la misma tendencia que muestran los libros de una biblioteca o los montones de papeles y manuscritos en un escritorio) a menos que la detengamos. (La analogía del movimiento térmico irregular es, en este caso, la repetida manipulación de tales objetos sin molestarnos en colocarlos de nuevo en su lugar.)

LA ORGANIZACIÓN SE MANTIENE EXTRAYENDO EL “ORDEN” DEL MEDIO AMBIENTE

¿Cómo podemos expresar mediante la teoría estadística esa maravillosa facultad de un organismo viviente, gracias a la cual retarda el decaimiento que lo conduce al equilibrio termodinámico (la muerte)? Dijimos antes: “Se alimenta de entropía negativa”, atrayendo hacia sí mismo, por así decirlo, un flujo de entropía negativa, a fin de compensar el aumento de la entropía que produce viviendo, y por lo tanto para mantenerse en un nivel de entropía estacionario y relativamente bajo.

Si D es una medida del desorden, su recíproco, $1/D$, puede entenderse como una medida directa del orden. Puesto que el logaritmo de $1/D$ es solamente menos el logaritmo de D , podemos expresar la ecuación de Boltzmann así:

$$-(\text{entropía}) = k \log (1/D).$$

Por ende, la torpe expresión “entropía negativa” puede sustituirse por una mejor: la entropía, con el signo de menos antecediéndola, es en sí misma una medida del orden. Así, el dispositivo gracias al cual un organismo se mantiene estacionario en un nivel relativamente alto de orden (= nivel relativamente bajo de entropía) en realidad consiste en la acción de absorber orden de su entorno continuamente. Tal conclusión es menos paradójica de lo que parece a primera vista. Más bien se la podía tachar de trivial. Efectivamente, en el caso de los animales más evolu-

cionados, sabemos bien cuál es el tipo de orden que los alimenta, a saber, el estado extremadamente ordenado de la materia, formada con compuestos más o menos complejos que les sirven de alimento. Tras utilizarlos, los devuelven en una forma mucho más degradada —aunque no enteramente degradada, pues las plantas todavía los pueden utilizar—. (Éstas, claro, obtienen de la luz del sol su suministro más potente de “entropía negativa”.)

LAS NUEVAS LEYES QUE PODEMOS ESPERAR EN EL ORGANISMO

En este capítulo final, lo que brevemente quiero poner en claro es que a partir de todo lo que hemos aprendido sobre la estructura de la materia viviente debemos estar preparados para encontrar que ésta trabaja en una forma que no puede reducirse a las leyes ordinarias de la física. Y lo anterior, no con base en el hecho de que exista alguna “fuerza nueva”, o cualquier otra cosa, que dirija el comportamiento de los átomos individuales dentro de un organismo viviente, sino porque la construcción es distinta a cualquiera que ya se haya investigado en el laboratorio. Para expresarlo groseramente, un ingeniero que sólo esté familiarizado con las máquinas térmicas estará dispuesto, tras inspeccionar la estructura de una dinamo, a aceptar que ésta funciona según principios que él todavía no entiende. El cobre de las conocidas calderas aquí lo encuentra en la forma de largos alambres enrollados; el hierro de las palancas y barras y cilindros de las conocidas máquinas de vapor, aquí lo ve dentro de esos rollos de alambre de cobre. Se convencerá de que es el mismo cobre y el mismo hierro, sujetos a las mismas leyes de la naturaleza, y en esto tendrá razón. La diferencia en su construcción es suficiente para prepararlo a esperar un tipo de funcionamiento enteramente distinto. No supondrá que un fantasma impulsa a la dinamo al ver que empieza a girar, sin horno y sin vapor, cuando alguien acciona un interruptor.

RESUMEN DE LA SITUACIÓN BIOLÓGICA

El desenvolvimiento de los sucesos en el ciclo vital de un organismo muestra una regularidad y un orden admirables que no es comparable a nada de lo que podamos encontrar en la materia inanimada. Vemos que está controlado por un grupo de átomos supremamente bien ordenado que representa sólo una mínima porción de la suma total en cada célula. Más aún, de la idea que nos hemos for-

mado del mecanismo de la mutación, concluimos que la dislocación de sólo unos cuantos átomos dentro del grupo de los “átomos gobernadores” de la célula germinal es suficiente para acarrear un cambio bien definido en las características hereditarias generales del organismo.

Tales hechos sin duda son los más interesantes que la ciencia ha revelado en nuestros tiempos. Pudiera ser que estuviéramos inclinados, al fin y al cabo, a encontrar que no son totalmente inaceptables. El asombroso don de un organismo para concentrar un “flujo de orden” en sí mismo y de esta manera evitar el decaimiento y caer en el caos atómico —de “beber el orden” en un medio ambiente adecuado— aparentemente se conecta con la presencia de “sólidos aperiódicos”, las moléculas cromosómicas, que sin lugar a dudas representan el más alto grado de asociación atómica bien ordenada que conozcamos —mucho mayor que la del cristal periódico ordinario— en virtud de la función individual que juegan en esta asociación cada átomo y cada radical.

En una palabra, somos testigos de que el orden existente despliega el poder de mantenerse a sí mismo y de producir sucesos ordenados. Tal cosa parece plausible, aunque al pensar que es así, sin duda nosotros nos basamos en la experiencia relacionada con la organización social y con otros sucesos que implican la actividad de organismos vivientes. Y por ende pudiera parecer que algo parecido a un círculo vicioso está en juego.

RESUMEN DE LA SITUACIÓN FÍSICA

Sea como fuere, el punto que hay que subrayar una y otra vez es que para un físico tal estado de cosas no sólo no es verosímil, sino que es muy emocionante, pues no tiene precedentes. Al contrario de la opinión común, el curso regulado de los acontecimientos, gobernado por las leyes de la física, jamás es la consecuencia de una bien ordenada configuración de átomos —no lo es, a menos que esa configuración de átomos se repita gran número de veces, ya sea en el cristal periódico o en un líquido o gas formado por un gran número de moléculas idénticas—.

Incluso cuando un químico investiga *in vitro* una molécula muy compleja, siempre se encuentra con una cantidad enorme de moléculas. Las leyes químicas son aplicables a éstas. Él químico podría decirnos, por ejemplo, que un minuto tras haber dado inicio a cierta reacción en particular, la mitad de las moléculas habrán reaccionado, y tras el segundo minuto, las tres cuartas partes lo habrán hecho. Pero no le es posible predecir si una molécula en particular, suponiendo

que se pudiera seguir su curso, está entre las que ya han reaccionado o entre las que aún no han reaccionado. Es ésta una cuestión de pura aleatoriedad.

No es una conjetura puramente teórica. No se trata del hecho de que jamás podamos observar el destino de un grupo individual de átomos o incluso de un solo átomo. Ocasionalmente lo podemos hacer. Pero siempre que lo hacemos nos encontramos con una irregularidad total que sólo en promedio coopera en la producción de la regularidad. Vimos un ejemplo en el capítulo I.¹⁵ El movimiento browniano de una partícula pequeña suspendida en un líquido es totalmente irregular. Pero si hay muchas partículas similares, mediante su movimiento irregular todas darán lugar al fenómeno regular de la difusión.

Se puede observar la desintegración de un solo átomo radiactivo (éste emite un proyectil que causa una cintilación visible en una pantalla fluorescente). Pero si se trata de un solo átomo radiactivo, su tiempo probable de vida es mucho más incierto que el de un gorrión saludable. De hecho, poco más se puede decir al respecto que lo siguiente: mientras viva (y podría ser durante miles de años), ya sea grande o pequeño, la posibilidad de que explote o no el átomo en el segundo sucesivo es la misma. Esta patente carencia de determinación individual, sin embargo, da por resultado la exacta ley exponencial del decaimiento de un gran número de átomos radiactivos del mismo tipo.

EL CONTRASTE SORPRENDENTE

En la biología vemos una situación completamente diferente. Un grupo de átomos que existe en sólo una copia produce sucesos ordenados, maravillosamente armonizados entre sí y con el entorno de acuerdo con leyes muy sutiles. Dije, que existe en sólo una copia, pues al fin y al cabo tenemos los ejemplos del huevo y del organismo unicelular. En las subsecuentes etapas de un organismo más evolucionado, las copias se multiplican, es verdad. ¿Pero cuánto? Creo saber que algo así como 10^{14} en un mamífero adulto. ¡Qué significa! Tan sólo una millonésima parte del número de moléculas en una pulgada cúbica de aire. Aunque son comparativamente grandes, su coalescencia sólo formaría una minúscula gota líquida. Y hay que ver la forma en que se encuentran realmente distribuidas. Toda célula hospeda únicamente a una de ellas (o dos, si recordamos la diploidía). Conociendo el poder que esta minúscula oficina central tiene en una célula indi-

¹⁵ Apartados “Índole y propósito de la investigación” (p. 115) hasta “La regla $\sqrt{n}$ ” (p. 127) de la presente edición. [Comps.]

vidual, ¿no es cierto que las células se parecen a las comisarías de un gobierno local que se extienden a través del cuerpo y que se comunican entre sí fácilmente gracias al código que es común en todas?

Bueno, ésta es una descripción fantasiosa que acaso sea más digna de un poeta que de un físico. Sin embargo, no es necesario poseer una imaginación poética, sino simplemente una mente científica clara y sobria, para reconocer que obviamente nos encontramos aquí con sucesos cuyo desarrollo regular y regulado se “guía” por un mecanismo totalmente distinto al “mecanismo de probabilidad” de la física. Es un dato simplemente empírico el hecho de que el principio que guía el comportamiento de toda célula está incorporado en la asociación atómica individual que existe sólo en una copia (a veces, en dos) —y también un dato empírico es que este principio produce acontecimientos que son un parangón del orden—. Ya sea que nos parezca asombroso o muy verosímil que un pequeño pero altamente organizado grupo de átomos sea capaz de actuar de esta manera, la situación no tiene precedentes, no se sabe que exista más que en la materia viviente. Los físicos y los químicos que han investigado la materia inanimada jamás han sido testigos de fenómenos que se tuvieran que interpretar de esta manera. El caso no se ha dado y por lo tanto nuestra teoría no lo ampara; nuestra hermosa teoría estadística que con razón tanto nos enorgullece, pues nos ha permitido mirar tras la cortina, observar el magnífico orden de la exacta ley física que surge del desorden atómico y molecular; porque nos ha revelado que la más importante, más general, más englobante ley de la entropía puede comprenderse sin una suposición *ad hoc* especial, pues no consiste más que en el desorden molecular mismo.

DOS FORMAS DE PRODUCIR EL ORDEN

El orden que existe en el desarrollo de la vida tiene un origen diferente. Al parecer hay dos “mecanismos” diferentes mediante los cuales es posible producir acontecimientos ordenados: el “mecanismo estadístico” que produce “orden a partir del desorden”, y el nuevo mecanismo que produce “orden a partir del orden”. Para una persona sin prejuicios, el segundo principio parece ser mucho más sencillo, mucho más plausible. Sin duda lo es. Por este motivo los físicos se sintieron tan orgullosos de haber dado con el otro, el principio del “orden a partir del desorden” que en realidad sigue la naturaleza y que es el único que proporciona una comprensión de la gran tendencia que existe en los sucesos naturales, en primer lugar, la de su irreversibilidad. Pero no podemos esperar que las “leyes de la

física” derivadas de éste sean de inmediato suficientes para explicar el comportamiento de la materia viviente, cuyos rasgos más notables visiblemente se basan en gran medida en el principio del “orden a partir del orden”. Uno no esperaría que dos mecanismos enteramente distintos produjeran el mismo tipo de ley —uno tampoco esperaría que la llave de su casa también abriera la puerta del vecino—.

Por lo tanto, no nos debe descorazonar la dificultad de interpretar la vida mediante las leyes comunes de la física. Pues eso es justo lo que se podría esperar con base en el conocimiento que hemos adquirido sobre la estructura de la materia viviente. Debemos estar preparados para encontrar un nuevo tipo de ley física en ésta. ¿O es que vamos a tener que llamarla una ley no física, por no decir, suprafísica?

EL NUEVO PRINCIPIO NO ES DESCONOCIDO PARA LA FÍSICA

No, creo que no. El nuevo principio es genuinamente físico: no es otra cosa, en mi opinión, que una vez más el principio de la teoría cuántica. A fin de explicar esto, tenemos que alargarnos, incluso depurando, no digamos enmendando, la afirmación anterior, a saber, que todas las leyes físicas se basan en estadísticas.

Esta afirmación, una y otra vez reiterada, tenía que terminar por provocar su contradicción. De hecho, existen fenómenos cuyos rasgos conspicuos se basan visiblemente en el principio del “orden a partir del orden” y al parecer nada tienen que ver con la estadística o el desorden molecular.

El orden del Sistema Solar, el movimiento de los planetas, se mantiene durante un periodo casi indefinible. Una constelación actual está conectada directamente con la misma constelación que se veía en los tiempos de las pirámides; la actual se remonta a ésta, o viceversa. Los cálculos actuales sobre los eclipses históricos corroboran el registro histórico que de ellos existe y en algunos casos incluso han permitido corregir la cronología aceptada. Estos cálculos no implican estadísticas de ningún tipo, basándose únicamente en la ley de la atracción universal de Newton.

Tampoco el movimiento regular de un buen reloj o de cualquier mecanismo similar parece tener nada que ver con la estadística. En una palabra, todos los sucesos mecánicos al parecer siguen clara y directamente el principio del “orden a partir del orden”. Y si decimos “mecánicos”, el término debe tomarse en sentido amplio. Existe un tipo de reloj muy útil que se basa, como ustedes lo saben, en la transmisión regular de pulsaciones desde una central eléctrica.

Recuerdo un breve estudio muy interesante de Max Planck acerca del tema “El tipo de ley dinámico y el tipo de ley estadístico” (“Dynamische und statistische Gesetzmässigkeit”). La distinción es precisamente la misma que la que aquí hemos denominado “orden a partir del orden” y “orden a partir del desorden”. El objeto de ese estudio era mostrar cómo el interesante tipo de ley estadística, que controla los sucesos de amplia escala, se constituye a partir de las leyes “dinámicas” que supuestamente gobiernan los sucesos de reducida escala, la interacción de los átomos y las moléculas individuales. El tipo anterior se ejemplifica con fenómenos mecánicos de amplia escala, como el movimiento de los planetas o de los relojes, etcétera.

Así que parecería que el “nuevo principio”, el principio del orden a partir del orden, que nosotros señalamos con gran solemnidad como la clave de la comprensión de la vida, no es nada nuevo en la física. El planteamiento de Planck incluso reivindica su prioridad. Al parecer podemos llegar a la ridícula conclusión de que la clave de la comprensión de la vida está en que se basa en un mecanismo puro, un “mecanismo de reloj” en el sentido del estudio de Planck. Esta conclusión no es ridícula y no es, en mi opinión, totalmente errónea, pero se debe tomar “con una gran dosis de escepticismo”.

EL MOVIMIENTO DE UN RELOJ

Analicemos cuidadosamente el movimiento de un reloj. En lo absoluto es un fenómeno puramente mecánico. A un reloj puramente mecánico no sería necesario darle cuerda. Una vez puesto en marcha, seguiría funcionando para siempre. Un reloj sin cuerda se detendría tras unas cuantas pulsaciones del péndulo, su energía mecánica se convertiría en energía térmica. Éste es un proceso atómico infinitamente complejo. La idea general que de él se forma un físico lo induce a pensar que el proceso inverso no es enteramente imposible: un reloj sin cuerda podría de repente empezar a funcionar, a expensas de la energía térmica de sus piñones y del entorno. El físico tendría que decir: este reloj experimenta un ataque excepcionalmente intenso de movimiento browniano. Ya vimos en el capítulo 1 (§ 9)¹⁶ que con una balanza torsional muy sensible (electrómetro o galvanómetro) ese tipo de cosas sucede con frecuencia. En el caso de un reloj resulta, claro es, infinitamente improbable.

¹⁶ Apartado “Tercer ejemplo (límites de la precisión de la medición)” (p. 126) de la presente edición. [Comps.]

El hecho de que se le asigne o no un movimiento de reloj a un tipo de suceso dinámico o a un tipo de suceso estadístico (para utilizar la terminología de Planck) depende de nuestra actitud. Si lo denominamos fenómeno dinámico, nos fijamos en el funcionamiento regular garantizado por una cuerda comparativamente débil, la cual permite que supere las pequeñas perturbaciones debidas al movimiento térmico, por lo que las podemos descartar. Pero si recordamos que si no tiene cuerda el reloj se va deteniendo gradualmente a causa de la fricción, entonces vemos que el proceso sólo puede entenderse como un fenómeno estadístico.

A pesar de lo insignificante que puedan ser desde un punto de vista práctico los efectos de la fricción y el calor en un reloj, no hay duda de que la segunda actitud, que no los descarta, es la más fundamental de ambas, incluso cuando consideramos el movimiento regular de un reloj impulsado por su cuerda. Pues no se debe pensar que el dispositivo propulsor realmente elimina la naturaleza estadística del proceso. El esquema verdaderamente físico implica la posibilidad de que incluso un reloj que funciona con regularidad, de repente revierta su movimiento, y, funcionando hacia atrás, se dé cuerda nuevamente —a expensas de la energía térmica del medio ambiente—. Este suceso es “todavía menos probable” que el “ataque browniano” en un reloj sin dispositivo propulsor.

EL FUNCIONAMIENTO AL FIN Y AL CABO ESTADÍSTICO DE LOS MECANISMOS RELOJEROS

Revisemos ahora la situación. El caso “sencillo” que hemos analizado es representativo de muchos otros —de hecho, de todos los que parecen eludir el principio englobante de la estadística molecular—. Los mecanismos relojeros que están hechos de materia física real (en contraste con la imaginaria) no son auténticos “mecanismos relojeros”. El elemento de la aleatoriedad puede reducirse más o menos; la posibilidad de que el reloj de repente empiece a funcionar mal puede ser infinitesimal, pero es una posibilidad que siempre existe. Incluso en el movimiento de los cuerpos celestiales existen las irreversibles influencias del calor y la fricción. Así, la rotación de la Tierra se ve lentamente disminuida por la fricción de las mareas, y junto con esta reducción la luna gradualmente se aparta de la Tierra, cosa que no sucedería si ésta fuera una rígida esfera rotativa.

Sin embargo, el hecho es que los “mecanismos relojeros” visiblemente exhiben muy prominentes rasgos del “orden a partir del orden” —el tipo de orden que despertó el entusiasmo de los físicos cuando los descubrieron en el organismo—.

Parecería que los dos casos tienen al fin y al cabo algo en común. Habrá que descubrir cuál es este factor y cuál es la diferencia notable que hace que el caso del organismo sea, después de todo, una novedad sin precedentes.

EL TEOREMA DE NERNST

¿Cuándo manifiesta un sistema físico —cualquier asociación de átomos— una “ley dinámica” (en el sentido de Planck) o “aspectos de mecanismo relojero”? La teoría cuántica tiene una muy breve respuesta para esta pregunta; a saber, a una temperatura de cero absoluto. Al aproximarse a la temperatura de cero kelvin, el desorden molecular deja de influir en los sucesos físicos. Este hecho no fue, por cierto, descubierto teóricamente, sino por la esmerada investigación de las reacciones químicas con una amplia gama de temperaturas, y la extrapolación de los resultados en la temperatura cero (a la cual no se puede llegar realmente). Éste es el famoso “teorema térmico” de Walther Nernst, al que no sin razón a veces se le otorga el distinguido nombre de “tercera ley de la termodinámica” (siendo la primera el principio de la energía y la segunda el principio de la entropía).

La teoría cuántica proporciona la base racional de la ley empírica de Nernst y también nos permite calcular hasta dónde puede acercarse un sistema al cero absoluto sin dejar de mostrar un comportamiento aproximadamente “dinámico”. ¿Cuál es la temperatura que en todo caso ya equivale prácticamente al cero?

Ahora, ustedes no deben pensar que esta última tiene que ser una temperatura muy baja. Efectivamente, el descubrimiento de Nernst fue inducido por el hecho de que incluso con una temperatura ambiental la entropía desempeña un papel sorprendentemente insignificante en muchas reacciones químicas. (Permítanme recordarles que la entropía es una medida directa del desorden molecular, es decir, que es su logaritmo.)

EL RELOJ DE PÉNDULO PRÁCTICAMENTE SE ENCUENTRA A UNA TEMPERATURA CERO

¿Qué sucede en el caso del reloj de péndulo? En su caso, la temperatura ambiental prácticamente equivale a cero. Es ésta la razón por la que funciona “dinámicamente”. Seguirá funcionando si uno lo enfría (¡con la condición de que se le haya quitado hasta la última gota de lubricante!). Pero no seguirá funcionando

si uno lo calienta más arriba de la temperatura ambiental, pues terminará por derretirse.

LA RELACIÓN ENTRE UN MECANISMO
RELOJERO Y EL ORGANISMO

Lo anterior parece trivial, pero toca, creo yo, el punto esencial. Los mecanismos relojeros son capaces de funcionar “dinámicamente” porque están contruidos con sólidos que las fuerzas London-Heitler mantienen en buen estado y que son lo suficientemente fuertes para eludir la tendencia al desorden del movimiento térmico, a una temperatura ordinaria.

Creo yo que sólo se requieren unas cuantas palabras más para revelar en qué consiste la similitud entre un mecanismo relojero y un organismo. Ésta consiste pura y sencillamente en que el organismo también depende de un sólido: el cristal aperiódico que forma la sustancia hereditaria, muy resguardada del desorden del movimiento térmico. Pero por favor no me acusen ustedes de decir que las fibras cromosómicas sólo son los “piñones de la máquina orgánica” —sin hacer referencia por lo menos a las profundas teorías físicas que sustentan la metáfora—.

Pues sin duda se requiere de menos retórica todavía para señalar la diferencia fundamental entre ambos y para justificar en el caso biológico los epítetos de novedoso y sin precedente.

Los aspectos más notables son: primero, la curiosa distribución de los piñones en un organismo con muchas células, respecto a la cual puedo referirme a su descripción algo poética en § 64;¹⁷ y segundo, el hecho de que el piñón principal evidentemente no es de manufactura humana, sino la obra de arte más preciosa que se haya elaborado según los lineamientos de la mecánica cuántica del Señor.

¹⁷ Apartado “El contraste sorprendente” (p. 146) de la presente edición. [Comps.]

Alexander Oparin

V. LA NATURALEZA DE LA VIDA*

LA AMPLITUD DE LA VIDA

Vida... Esta palabra es tan fácil de entender y, sin embargo, es tan enigmática para cualquier persona pensante. Uno podría suponer que el significado de la palabra tendría que haber sido indudable y el mismo en todas las épocas. Sin embargo, sabemos que a lo largo de los muchos siglos de la historia de la cultura humana ha habido discusiones irreconciliables acerca de cómo se debería entender con propiedad.

Incluso la cuestión de cuáles entes están vivos, de cuáles son los objetos en el mundo que nos rodea que están dotados o imbuidos de vida, de cuál es la amplitud o el ámbito del reino de la vida, se han definido y todavía se siguen definiendo en diversas formas totalmente distintas. Nos encontramos frente a un espectro multicolor, por así decirlo, de opiniones diferentes. En uno de los extremos de este espectro están las ideas de aquellos filósofos y científicos que piensan que la vida es una propiedad general, inseparable de toda la materia, y quienes por lo tanto amplían el reino de la vida, englobando todos los objetos del universo.

Por otra parte, los filósofos en el extremo opuesto del espectro arbitrariamente restringen el ámbito de la vida a los límites de la existencia humana, o incluso a veces mantienen que la vida es prerrogativa de tan sólo un sujeto pensante.

La primera de estas opiniones debe su origen a los antiguos partidarios griegos del hilozoísmo. Según Aristóteles, incluso Tales, el fundador de la escuela miletiana de filosofía, creía que los imanes estaban vivos, ya que tenían la habilidad de atraer el hierro. Más de 2000 años después, en el siglo XVII, Spinoza, el filósofo materialista neerlandés, mantenía que las piedras piensan y que todos los cuerpos naturales son animados, mientras que aun 100 años después (también en los Países Bajos) el filósofo francés J. B. R. Robinet publicó un libro con el título de *De la nature* [Acerca de la naturaleza], donde reconocía que toda la

* Este texto apareció originalmente como el capítulo 1 en A. I. Oparin, *Life: Its Nature, Origin, and Development*, trad. de A. Synge, Academic Press, Nueva York, 1964, pp. 1-37.

materia estaba viva e incluso consideraba que las estrellas son cuerpos orgánicos vivientes.

Incluso en nuestros tiempos, muchos ingenieros y físicos no dudan en considerar que los más complejos mecanismos y autómatas modernos están vivos, así como Descartes comparaba a los organismos animados con los relojes de agua o con los molinos, o como La Mettrie equiparaba al hombre con una máquina extremadamente bien educada. Algunos químicos y genetistas actuales, en sus intentos de asignarle la vida hasta a las moléculas individuales de las sustancias orgánicas, parecen seguidores de Diderot.

Por otra parte, cualquier persona entiende que cuando algún escritor o filósofo habla en alguna de sus obras sobre el significado o el valor o la meta de la vida, se está refiriendo sólo a la vida humana, a ese “esfuerzo hacia el bien” que según Tolstói constituye la principal aspiración de la vida y es cosa aceptada por la mayoría de los hombres.

Esta última opinión se encuentra en *Acerca de la vida*,¹ de Tolstói. En ésta Tolstói censura a los científicos experimentales, o, como los denomina, escribas,² por utilizar la palabra “vida”, pues con astuta sofistería han inventado un lenguaje científico artificial, especie de volapuk, donde las palabras no se corresponden con el significado que les dan las personas comunes. Tolstói justificadamente recomienda que “un hombre está obligado, mediante todas y cada una de sus palabras, a dar a entender lo que todos comprenden sin lugar a dudas de la misma manera”.

Me parece a mí que si seguimos este sabio consejo habremos de encontrar una salida al actual, confuso laberinto de opiniones contradictorias sobre la cuestión de la delimitación del reino de la vida, aunque encontremos que este camino estará lejos de ser el mismo que Tolstói recomendaba. Toda persona común que observe el mundo que le rodea, infaliblemente lo clasificará ya sea en el reino de lo inanimado o inorgánico, ya sea en el reino de los entes vivientes. En todo lugar y en todo momento verá que la vida no simplemente está regada por doquier, sino que sólo existe en los organismos individuales que viven separadamente del medio ambiente; de modo que la suma de tales organismos constituye el reino de la vida, el mundo de los entes vivos. Este mundo despliega una colosal diversidad, incluidos las plantas, los animales y los microbios, que, a primera vista, parecería que no pueden tener nada en común. Sin embargo, cualquier persona, in-

¹ L. Tolstói, *О жизни* [*O žizni*, *Acerca de la vida*], 1886-1887.

² Aquí Tolstói emplea el término “escriba” en el sentido peyorativo que tiene en los evangelios, “escribas y fariseos”.

cluso sin ningún tipo de educación científica, fácilmente puede identificar lo que en efecto tienen en común y lo que le permite a uno incluir en la categoría de los entes vivos a un hombre y a un árbol, a una ballena y a un minúsculo insecto o una insignificante hierba, a un pájaro y a un molusco deforme.

Cuando Leeuwenhoek, el sencillo pulidor de vidrio de Ámsterdam, por primera vez observó microbios de diversos tipos a través de su lupa, no dudó en designarlos como entes vivientes (*viva animalcula*), aunque algunos de ellos, por ejemplo, las bacterias coco que él dibujó con su propia mano, no podían moverse y no poseían ninguno de los rasgos externos de los entes vivientes.

Al darse uno cuenta de que los entes vivientes tienen algo en común que los relaciona entre sí, uno los diferencia de los objetos del mundo inorgánico que carecen de ese “algo”, es decir, que carecen de vida. Así, mediante la simple observación personal del mundo que la rodea, cualquier persona común puede establecer por sí misma la definición más elemental, pero también la más general, de la amplitud de la vida o del ámbito de su reino natural. La vida es una propiedad de todo organismo, desde el más evolucionado hasta el más bajo, pero una propiedad que no existe en los objetos naturales inorgánicos, a pesar de la complejidad que pueda tener su estructura. Es muy posible que exista en la extensión sin límites del universo una multitud de formas de movimiento y organización de la materia extremadamente complejas y con un alto grado de evolución, cuya existencia nosotros todavía no sospechamos; pero sería totalmente injustificado afirmar que cualquiera de estas formas tuviera “vida” si en sus principios esenciales fuera distinta a la vida representada en nuestro planeta por una enorme multitud de organismos de formas diferentes. Si algún día llega a necesitarse, será mejor que inventemos una nueva palabra para designar a esas formas de organización.

Hemos demarcado así la región de la naturaleza, la categoría de los objetos que son pertinentes en nuestras reflexiones sobre la vida. Esto significa que, en lo que sigue, podremos evitar muchos de los errores que son bastante comunes en la literatura científica, si nos atenemos estrictamente a los términos de referencia antes expuestos. Claro es, no se ha dado en absoluto una definición de la vida. Para darla, uno tendría que solucionar el problema de la naturaleza de ese “algo” que únicamente es característico en el mundo de los entes vivientes y que está ausente en los objetos de naturaleza inorgánica.

LA DISCUSIÓN ENTRE EL IDEALISMO Y EL MATERIALISMO
RESPECTO A LA NATURALEZA ESENCIAL DE LA VIDA

Desde la Antigüedad y hasta nuestros días, este problema de la naturaleza esencial de la vida ha sido siempre un campo de batalla en la amarga contienda de los irreconciliables campos del idealismo y del materialismo.

Los representantes del campo idealista ven, como la esencia de la vida, una especie de origen eterno supramaterial que es inaccesible a la experimentación. Es la “psique” de Platón, la “entelequia” de Aristóteles, el “alma inmortal” o la “partícula divina” de diversas doctrinas religiosas, el *inneres Prinzip der Kausalität* [principio interno de causalidad], el *Weltgeist* [espíritu del mundo] de los hegelianos, la “fuerza vital” de los vitalistas y la fuerza “dominante” de los neovitalistas, y demás conceptos similares.

Desde este punto de vista, la materia, en el sentido de esa realidad objetiva que observamos directamente y estudiamos experimentalmente, es en sí misma y como tal, inanimada e inerte. Es simplemente la sustancia a partir de la cual el espíritu o el alma crea un ser vivo, le da forma, adapta su estructura a las necesidades funcionales, le otorga el poder de la respiración y el movimiento y, en general, le da vida. Y cuando el alma abandona el organismo y la muerte sobreviene, sólo permanece el envoltorio material sin vida, un cadáver que se descompone y pudre.

Este concepto de la muerte como el abandono del cuerpo por el alma, la cual constituye la esencia de la vida, es, de hecho, la base de una definición de la vida que se ha divulgado ampliamente y que incluso aparece en varias enciclopedias; a saber, que la vida es lo opuesto de la muerte. Sin embargo, esta definición pasa por alto el hecho de que los entes vivientes sólo pueden compararse adecuadamente con los entes no vivientes, pero no con los muertos. Es obvio que un cuerpo muerto es un producto de la vida, pues donde la vida no existe, es decir, en un mundo inorgánico, jamás podría darse un cadáver por sí mismo.

Aun partiendo de premisas idealistas, uno podría, claro es, realizar un estudio objetivo de organismos particulares y de sus órganos, pero sería inherentemente imposible llegar a una comprensión de la esencia de la vida misma mediante métodos experimentales y materialistas, ya que esta esencia posee una naturaleza supramaterial o espiritual. Sólo mediante el método de la introspección especulativa es posible llegar a una comprensión de ese principio divino que portamos dentro de nosotros. Sólo podemos contemplar pasivamente los demás entes vi-

vientes, maravillándonos de la sabiduría del Creador que los creó. Y, naturalmente, si uno adopta esta posición, la posibilidad de que el hombre modifique o transforme la naturaleza divina es nula.

Los materialistas plantean el problema de la esencia divina desde una perspectiva diametralmente contraria. Basando sus argumentos en los hechos descubiertos por la ciencia, ellos afirman que la vida, como el resto del mundo, es material, y que no se requiere, para su comprensión, la aceptación de un origen espiritual que no sea asequible por la investigación experimental. Al contrario, el estudio objetivo del mundo que nos rodea es, para el materialista, no sólo una manera esperanzadora de llevarnos a todos hasta una comprensión de la esencia misma de la vida, sino que también nos permitirá alterar intencionalmente la naturaleza viviente en una forma favorable para la humanidad.

Amplios círculos de científicos dedicados a la biología basan sus investigaciones, consciente o inconscientemente, en una concepción materialista de la naturaleza viviente y, siguiendo esta línea, enriquecen constantemente la ciencia de la vida con su trabajo y nos aproximan a una comprensión de la esencia de la vida.

CONCEPTOS MECÁNICOS Y DIALÉCTICOS DE LA VIDA

Sin embargo, incluso dentro de los límites del concepto materialista de la vida, su esencia puede interpretarse de varias maneras.

Según la doctrina materialista, que prevaleció en el mundo científico del siglo pasado y que todavía hoy en parte se acepta, la comprensión de la vida en general consiste simplemente en una explicación cabal basada en la física y la química, una cabal elucidación de todos los fenómenos vivientes en cuanto procesos físicos y químicos. Si uno adoptara esta posición, no habría lugar para cualesquiera leyes específicamente biológicas de la naturaleza. En realidad sólo existiría una ley que gobernara tanto el mundo inorgánico, como todos los fenómenos que ocurren en los organismos vivientes. Tal cosa sería, de hecho, la negación de que haya una diferencia cualitativa entre los organismos y los objetos inorgánicos. Por lo tanto, llegaríamos a una posición donde tendríamos que decir, ya sea que los objetos inorgánicos están vivos, ya sea que la vida no existe realmente. Así, mediante un desarrollo lógico del punto de vista materialista que aquí se ha expuesto, nos veríamos obligados a adoptar una conclusión que se opone fundamentalmente a la idea que asumiéramos anteriormente. No obstante, es necesario señalar que se debe entender claramente que la aceptación de la naturaleza

material de la vida no significa que se deba negar que posea características específicas, que los entes vivientes muestren diferencias cualitativas de las de los objetos inorgánicos. Uno no tiene que hacer lo mismo que los mecanicistas, considerar que todo lo que no se incluye en la física y la química es vitalista o sobrenatural. Al contrario, las formas de organización y movimiento de la materia pueden ser muy diversas. Negar esta diversidad es entregarse a un exagerado simplismo.

Según la doctrina dialéctica materialista, la materia está en movimiento constante y pasa por una serie de etapas de desarrollo. En el curso de esta progresión surgen nuevas formas de movimiento de la materia, cada vez más complejas y más evolucionadas, las cuales poseen propiedades que anteriormente no tenían. Es indudable que durante un largo periodo tras la formación de nuestro planeta no existió la vida en éste. Obviamente, todas las cosas que en él existían en ese tiempo simplemente obedecían a las leyes de la física y la química. Sin embargo, en el proceso del desarrollo de la materia en la Tierra, los primeros y más primitivos organismos aparecieron, es decir, la vida surgió como una forma cualitativamente nueva del movimiento. Cuando esto sucedió, las viejas leyes de la física y la química naturalmente continuaron operando, pero ahora suplementadas por leyes biológicas nuevas y más complejas que anteriormente no habían estado en operación.

Por ende, la vida en su naturaleza es material, pero sus propiedades no se limitan a las de la materia en general. Sólo los seres vivientes la poseen. Es una forma especial del movimiento de la materia, cualitativamente diferente del movimiento en el mundo inorgánico; el organismo posee propiedades biológicas específicas y formas de comportamiento específicos, no simplemente sigue las reglas que gobiernan a la naturaleza inorgánica. Por lo tanto, un materialista dialéctico incluso formula el problema de la comprensión de la vida de una manera distinta a la del mecanicista. Para éste el problema consiste en una explicación más cabal de la vida con base en la física y la química. Para el materialista dialéctico, en la comprensión de la vida lo importante es el establecimiento de su diferencia cualitativa respecto a otras formas de la materia, es decir, la diferencia que nos obliga a ver la vida como una forma especial del movimiento de la materia.

LOS INTENTOS DE FORMULAR DEFINICIONES DE LA VIDA

Esta diferencia ha encontrado y aún encuentra un reflejo mayor o menor en las definiciones de la vida formuladas y expuestas por los científicos y pensadores

del siglo pasado y los de nuestra propia época. Es justamente en su planteamiento de esta distinción entre los entes vivientes y los entes no vivientes donde se puede percibir el valor objetivo y esencial de tales definiciones, no obstante su carácter absolutamente contradictorio y su asombrosa diversidad.

En el inicio de su extraordinario libro, *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux* [Lecciones sobre los fenómenos de vida comunes a animales y plantas],³ Claude Bernard expone muchas definiciones de la vida que habían sido elaboradas antes de su época, pero sólo lo hace para mostrar que generalmente cualquier definición apriorística de la vida siempre resulta quimérica y científicamente inútil. Sin embargo, también piensa que se puede entender totalmente la vida si se aborda *a posteriori*, mediante el establecimiento de los rasgos característicos que diferencian a los entes vivientes de los cuerpos no vivientes. Cosa ciertamente no fácil de hacer, y, al intentarla, nos tropezamos con considerables dificultades y dudas, aunque todo el tiempo nos vayamos acercando a la solución del problema.

En una enciclopedia estadounidense de 1944 se afirma que no existe una sola definición de la vida satisfactoria, ya que, mientras unas abarcan demasiados fenómenos, otras sufren de demasiadas limitaciones.

Nosotros creemos que esto se deriva de que en la mayoría de los casos la gente intenta caracterizar la vida como tan sólo un punto, mientras que la vida de hecho es una larga línea que abarca toda esa sección del desarrollo de la materia que yace entre el origen de la vida en la Tierra y nuestros propios tiempos, y que incluye entre sus manifestaciones a los más primitivos organismos, tanto como a las plantas y animales más evolucionados, especialmente el hombre. Con la aparición del hombre, sin embargo, surge una nueva forma social de movimiento de la materia que es más compleja y ha evolucionado más que la vida, caracterizándose por sus propios rasgos peculiares y por las leyes especiales del desarrollo de la sociedad humana.

Es por lo tanto totalmente erróneo el intento de caracterizar la “línea de la vida” simplemente sobre la base de un punto, ya sea que este punto se encuentre en el inicio, la mitad, o el final. De hecho, si tratamos de definir la vida a partir de las características que surgieron en el inicio mismo de su aparición en la Tierra, tenemos que excluir de entre sus rasgos no sólo la conciencia, sino también la respiración, fenómenos que obviamente no se dieron en los organismos más primitivos. Por otra parte, si definimos la vida sobre la base de fenómenos que sólo

³ C. Bernard, *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*, 2 tomos, Librairie J.-B. Baillière et Fils, París, 1878-1879.

son típicos en los entes vivientes más altamente desarrollados, nos arriesgamos a relegar a las bacterias anaeróbicas, así como a muchos organismos primitivos, a la categoría de cuerpos no vivientes que pertenecen a la naturaleza inorgánica.

Cuando Engels, en su notable definición de la vida, la explicó como el “modo de existencia de los cuerpos albuminoideos”, de inmediato expresó sus reservas, señalando las limitaciones de su definición:

Nuestra definición de la vida —dijo Engels— es naturalmente muy inadecuada, en la medida de que lejos de incluir *todos* los fenómenos de la vida, se limita a los que son más comunes y más sencillos. Desde una perspectiva científica todas las definiciones poseen poco valor. A fin de alcanzar un conocimiento realmente exhaustivo sobre lo que la vida es, tendríamos que considerar todas las formas en las que aparece, desde las más bajas hasta las más altas.

Así, a fin de obtener un conocimiento exhaustivo de la vida, es necesario conocer toda la gama de sus rasgos característicos, empezando por los más elementales, aquellos con que estaban dotados los primeros entes vivientes, y terminando con las más complejas manifestaciones de la actividad neural en los animales y en el hombre, en quien culmina la etapa biológica del desarrollo de la materia. Entre esta multitud de rasgos característicos de la vida que se manifestaron en el inicio mismo de su desarrollo y que se hicieron más complejos en el curso de su sucesiva evolución y complejidad creciente, hay que mencionar en especial esa claramente definida, específica interacción entre el organismo y su entorno, la cual atraviesa, como un hilo rojo, la “línea de la vida”, y es característica de los entes vivientes, tanto los más bajos como los más altos, pero no aparece en los objetos del mundo inorgánico.

LA INTERACCIÓN ESPECÍFICA ENTRE EL ORGANISMO Y SU MEDIO AMBIENTE

Un organismo sólo puede vivir y mantenerse mientras intercambie continuamente sustancias y energía con su medio ambiente. En la forma de comida, bebida y gases, diversas sustancias externas de naturaleza química se introducen en el organismo. Experimentan en su interior grandes cambios y transformaciones, y como resultado se convierten en la materia del organismo mismo. Es decir, se convierten en compuestos químicos que en cierto grado son similares a los que

ya son parte del cuerpo viviente. Ésta es la rama ascendente del metabolismo biológico que se conoce como la asimilación. En el proceso de la interacción de las sustancias externas con la materia del organismo, sin embargo, también ocurre continuamente un proceso antitético, conocido como la disimilación. No son inmutables las sustancias que forman parte del cuerpo viviente. Se descomponen con cierta rapidez a fin de liberar su energía latente, desechando los productos de su descomposición en el entorno.

Nuestro cuerpo fluye como un arroyo, su materia se renueva como el agua de una corriente. Esto es lo que enseñaba Heráclito, el antiguo filósofo dialéctico griego. Ese flujo, o simplemente el agua que sale de un grifo, nos permite entender en su forma más sencilla muchos de los aspectos esenciales de tal sistema fluido o abierto, representado por el caso particular del cuerpo viviente. Si el grifo no está totalmente abierto y la presión de la cisterna de agua permanece constante, la forma externa del agua que fluye del grifo casi no cambia, como si estuviera congelada. No obstante, sabemos que esta forma es meramente la expresión visible de un flujo continuo de partículas de agua que continuamente pasan a través de la corriente con una velocidad constante. Si perturbáramos la relación entre las velocidades de entrada o salida, o el proceso estable del movimiento de sus partículas, la corriente, como tal, desaparecería, puesto que la existencia misma de la corriente depende del paso constante a través de ella de moléculas de agua que se renuevan incesantemente.

En esta analogía, la estabilidad de la forma externa y hasta de la más intrincada estructura interna del ente viviente es meramente la expresión visible de la continuidad de la secuencia de procesos que tienen lugar en éste como resultado del equilibrio extremadamente complejo de los dos fenómenos contrapuestos que ya mencionamos, a saber, la asimilación y la disimilación. La prolongada existencia de un sistema viviente en cuyo interior la descomposición ocurre todo el tiempo se debe enteramente a este equilibrio. En el lugar de cada molécula o estructura que se descompone aparece una nueva o análoga como una formación recién sintetizada. De esta manera el organismo mantiene su forma, estructura y composición química, al mismo tiempo que cambia continuamente su materia.

Los organismos, por lo tanto, no son sistemas estáticos sino estables o fluidos. Su capacidad para existir durante un periodo largo o breve en medio de las condiciones ambientales dadas no depende de que permanezcan quietos o inmutables. Al contrario, depende de la continuidad de su movimiento, es decir, de su metabolismo.

Desde un punto de vista puramente químico, el metabolismo sólo es la suma

de un gran número de reacciones relativamente simples de oxidación, reducción, condensación aldólica, hidrólisis, transaminación, fosforilación, ciclización, etc. Todas estas reacciones se pueden reproducir, incluso fuera del organismo, ya que en ellas no hay nada específicamente conectado con la vida.

La peculiaridad que diferencia cualitativamente la vida de todas las demás formas de movimiento de la materia (y en particular de los sistemas fluidos inorgánicos) es que en el cuerpo humano los cientos de miles de reacciones químicas individuales que en conjunto integran el metabolismo no sólo se coordinan estrictamente en el tiempo y el espacio; no sólo cooperan entre sí armoniosamente en una sola secuencia de autorrenovación, sino que la totalidad de esta secuencia se dirige de manera ordenada hacia la continua autopreservación y autorreproducción del cuerpo viviente como un todo. Tales reacciones se ajustan perfectamente a la solución del problema de la existencia del organismo en medio de una serie dada de condiciones ambientales.

LA “INTENCIONALIDAD” DE LA ORGANIZACIÓN DE LOS CUERPOS VIVIENTES

El carácter fluido de la interacción de los cuerpos vivientes con el entorno, y, sobre todo, la asombrosamente eficaz adaptación de la organización de esta interacción a la tarea de la autopreservación y la autorreproducción del sistema bajo una serie dada de condiciones externas, todo eso que han llamado muchos autores la “adaptación de la forma a la función” o la “intencionalidad” que existe en la estructura de tal sistema, es tan objetivamente obvio y causa tal impresión en los investigadores de la naturaleza viviente que, en una forma u otra, se encuentra en la mayoría de incluso las más diversas definiciones de la vida formuladas a través de los siglos por miembros de las más disimilares escuelas de filosofía y pensamiento filosófico.

Aun Aristóteles observó la presencia en todos los organismos, sin excepción, de una adaptación de la forma a la función. Él fue el primero que tuvo la capacidad de generalizar a partir de la extensa acumulación de material biológico disponible en su época, describiendo esta propiedad específica de los entes vivientes como la “entelequia” que subyace en la vida, o el “principio que tiene el fin en sí mismo”.

En una forma u otra, las enseñanzas de Aristóteles acerca de la “entelequia” han dejado su marca en todas las definiciones idealistas de la vida. Se reflejan en

varias doctrinas religiosas y disciplinas filosóficas, y han perdurado a través de muchos siglos, apareciendo en nuestro propio siglo xx en los escritos de Reinke, Driesch y otros estudiosos contemporáneos del vitalismo.

Sin embargo, los representantes del campo materialista no podían pasar por alto en sus investigaciones sobre la vida este aspecto específico de ella. Muchos de ellos, siguiendo a Descartes, definieron los fenómenos vitales en las plantas y animales, meramente como las respuestas de un mecanismo corporal específicamente estructurado a las influencias externas del medio ambiente. Otros vieron la direccionalidad ordenada del metabolismo como la propiedad específica que distingue a los organismos de los entes no vivientes. En relación con esto, Claude Bernard dijo:

L'édifice organique est le siège d'un perpétuel mouvement nutritif, mouvement intestinal qui ne laisse de repos à aucune partie; chacune, sans cesse ni trêve, s'alimente dans le milieu qui l'entoure et y rejette ses déchets et ses produits. Cette rénovation moléculaire est insaisissable pour le regard direct; mais, comme nous voyons le début et la fin, l'entrée et la sortie des substances, nous en concevons les phases intermédiaires, et nous nous représentons un courant de matières qui traverse continuellement l'organisme et le renouvelle dans sa substance en le maintenant dans sa forme.

L'universalité d'un tel phénomène chez la plante et chez l'animal et dans toutes leurs parties, sa constance, qui ne souffre pas d'arrêt, en font un signe général de la vie, que quelques physiologistes ont employé à sa définition.⁴

Engels a su vez dijo: “Existe un término que se debe aplicar a todos los organismos y éste es la adaptación”. Luego propone su propia definición de la vida: “La vida es el modo de existencia de las sustancias albuminoideas y este modo de existencia esencialmente consiste en la autorrenovación constante de los constituyentes químicos de tales sustancias mediante la nutrición y la excreción”.

⁴ “El edificio orgánico es el asiento de un movimiento nutritivo perpetuo que no deja descansar a ninguna de sus partes: cada cual, sin descanso y sin tregua, se alimenta en el medio que lo rodea y ahí desecha sus residuos y sus productos. Esta renovación molecular no se puede captar visualmente; pero como podemos ver el inicio y el fin, la entrada y la salida de las sustancias, podemos concebir sus fases intermediarias, y nos hacemos la idea de una corriente de materia que atraviesa incesantemente el organismo y renueva su sustancia al preservar su forma.

“La universalidad de este fenómeno en las plantas y en los animales y en todas sus partes, la constancia del fenómeno, que jamás se detiene, lo convierten en un signo general de la vida que algunos fisiólogos han utilizado para definirla.”

En nuestros tiempos, Peret, y, posteriormente, Bernal, han intentado definir la vida en los siguientes términos, que acaso sean algo complicados para las personas que no son especialistas en la materia: “La vida es un sistema que potencialmente puede autoperpetuarse, un sistema abierto de reacciones orgánicas vinculadas, catalizadas paso a paso y casi isotérmicamente por complejos y específicos catalizadores orgánicos que son producto a su vez del sistema”.

Un representante de la escuela de biología michurinista afirma: “El organismo representa a un ente como sistema sólo en conjunción con las condiciones necesarias para su vida”.

Así, la “intencionalidad” universal de la organización de los seres vivos es un hecho objetivo y evidente que no puede ignorar ningún estudiante serio de la naturaleza. La corrección o incorrección de la definición de la vida que nosotros hemos propuesto, así como la de muchos otros, depende de la interpretación que se haga del término “intencionalidad” y de lo que se piense que sea su naturaleza y origen.

Los idealistas ven esta “intencionalidad” como el cumplimiento de cierto plan predeterminado por una deidad o “intelecto universal”. Los materialistas, por otra parte, utilizan el término (careciendo de uno mejor) como la forma más breve de caracterizar la direccionalidad de la organización del sistema viviente entero en aras de su autopreservación y autorreproducción bajo condiciones ambientales dadas, y como una manera de describir la adecuación de la estructura de cada parte del sistema viviente a la realización más eficaz y armónica de las funciones vitalmente necesarias que se relacionan con cada parte en particular.

La extremadamente desarrollada adaptación de la estructura de los órganos individuales a la realización de sus funciones y la “intencionalidad” de la organización total de la vida se aprecian como algo que es enormemente preciso, incluso si se tiene un conocimiento muy superficial de los entes vivos superiores. Como ya señalamos, fue algo que se observó hace mucho tiempo y que encontró su expresión en la “entelequia” aristotélica. Se había visto como algo esencialmente místico y sobrenatural, hasta que Darwin dio una explicación racional y materialista de la forma en que esta “intencionalidad” había surgido mediante la selección natural en los organismos superiores.

Sin embargo, la “intencionalidad” de la estructura no se manifiesta únicamente en las criaturas más organizadas; permea el mundo vivo entero desde arriba hasta abajo, llegando hasta las formas de vida más elementales. Es necesaria en todo cuerpo vivo, pero si no existiera el cuerpo vivo no habría “intencionalidad” bajo condiciones naturales. Por lo tanto, resultaría infructuoso que

buscáramos su explicación simplemente en términos de las leyes del mundo inorgánico, es decir, las leyes de la física y la química. La “intencionalidad” que es característica en la organización de todos los entes vivos sólo puede entenderse si uno comprende con base en el principio darwiniano las interacciones específicas entre el organismo y su entorno. Esta nueva ley biológica sólo podía surgir a partir del establecimiento de la vida, y, por lo tanto, los cuerpos inorgánicos no vivos carecen de “intencionalidad”. La notable excepción de esta regla es la máquina.

LOS INTENTOS DE VER EL ORGANISMO COMO UNA MÁQUINA

Es imposible, claro, dudar que el principio en que se basa la construcción de cualquier máquina sea el de la adaptación de su estructura u organización externa a la realización de la tarea específica a que está destinada. Desde este punto de vista, es obligada la comparación de la máquina con el organismo. A lo largo de los siglos muchos filósofos y científicos han recurrido a ella en sus intentos por solucionar el problema de la naturaleza esencial de la vida. En el curso de los diversos periodos del desarrollo de la ciencia, la única cosa que ha cambiado, en relación con tales intentos, ha sido la opinión sobre cuáles de los factores que tienen en común el organismo y la máquina deben verse como los aspectos más característicos de la vida. No obstante, no ha cambiado esencialmente la forma en que primero se planteó el problema a fin de intentar describir el organismo como cierto tipo de máquina. Es indudable que las ideas de cada época tienden a expresarse en términos de la tecnología vigente. En su libro,⁵ N. Wiener se refiere, muy pertinentemente, al siglo XVII y la primera parte del XVIII como la “edad de los relojes”; a la última parte del siglo XVIII y a todo el siglo XIX, como la “edad de las máquinas de vapor”; y a nuestros tiempos como la “edad de la comunicación y el control”.

En la edad de los relojes el hombre representaba el mundo como una enorme máquina a la que se le había dado cuerda una sola vez y para siempre. Para la gente, el fundamento de toda la existencia era el movimiento mecánico, el desplazamiento de los cuerpos en el espacio, que tenía lugar de acuerdo con las leyes del movimiento de Newton. La vida también se veía, con esta perspectiva, como meramente un tipo especial de movimiento mecánico. El movimiento espontáneo de los animales con sus órganos a través del espacio puede servir como la más

⁵ N. Wiener, *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Wiley, Nueva York, 1949.

clara expresión de este punto de vista. Así, de acuerdo con las ideas de ese tiempo, el organismo no es otra cosa que una “máquina muy complicada, cuya estructura es, sin embargo, completamente comprensible. Su movimiento depende enteramente de su estructura y de la presión y de la colisión de partículas de materia, como las ruedas en un reloj de agua” (Descartes). Por lo tanto, la anatomía ocupaba el lugar más importante en el estudio de la vida en ese tiempo.

No obstante, en el siguiente periodo del desarrollo de la ciencia, la edad de las máquinas de vapor, la fisiología empezó, cada vez más, a aspirar a ocupar este lugar, y en la investigación de la vida la energética asumió el papel que había jugado la mecánica.

Ahora se pensaba que el prototipo del hombre no era un reloj, sino una máquina de vapor. La analogía entre la respiración y la combustión de sustancias combustibles, propuesta por Lavoisier, representó un gran avance. La comida es simplemente un combustible que arrojamus en la caldera de nuestro organismo y por lo tanto su importancia puede evaluarse totalmente en términos de las calorías. Los principios en que en esa época se basaba la comprensión de la vida eran los de la conservación y la degradación de la energía. La primera ley de la termodinámica, la de la conservación de la energía, se consideraba universalmente aplicable tanto a los organismos como a los mecanismos.

Asunto más complicado era la segunda ley. Es ésta la ley que expresa la tendencia estadística en la naturaleza hacia el desorden, la tendencia de igualar la energía y de esta manera devaluarla en los sistemas aislados, tendencia que se expresa en términos generales como el aumento de la entropía en estos sistemas. Si uno hubiera de colocar tal sistema en condiciones uniformes, dejándolo solo, entonces todos los fenómenos que ocurrieran en su interior habrían de cesar muy rápidamente y el sistema como un todo llegaría a su fin. De esta manera alcanzaría el estado inmutable en que nada podría suceder. Los físicos califican este estado de “equilibrio termodinámico” o de “máxima entropía”.

Por otra parte, en los organismos la entropía no sólo no aumenta, sino que incluso puede decrecer. Así, uno podría decir que la ley fundamental de la física consiste en una tendencia hacia el desorden o en un aumento de la entropía, mientras que la de la biología, al contrario, sería una tendencia hacia el aumento de la organización, o una disminución de la entropía. Algunos filósofos idealistas, como A. Bergson, definieron la vida como la “lucha contra la entropía”, viendo incluso en la contraposición de la física y la biología una razón para aceptar la naturaleza sobrenatural de la vida.

Hoy, sin embargo, sabemos que el antagonismo es sólo aparente. Los entes

vivientes nunca pueden existir como sistemas aislados. Al contrario, como dijimos anteriormente, en los organismos vivientes la interacción constante con el medio ambiente es característica; en virtud de este hecho, se les debe considerar como sistemas “fluidos” o “abiertos”. El estado estacionario (pero no estático) en que existen se mantiene constante no porque se hallen en un estado de “máxima entropía”, o porque su entalpía libre sea mínima (como es el caso en el equilibrio termodinámico), sino porque el sistema abierto continuamente recibe del entorno una cantidad de energía libre que compensa la disminución de la energía dentro de sí mismo.

Wiener sostiene que la habilidad de contrarrestar la tendencia general al aumento de la entropía no sólo se encuentra en los organismos, sino también en las máquinas que son capaces de interactuar con el mundo externo en muchas formas específicas. De esta manera, él piensa que las máquinas son capaces de crear cierta zona local de organización a su alrededor.

LA CIBERNÉTICA

Este concepto introduce el tercero y actual periodo de la historia del problema: la edad de la comunicación y el control que ha remplazado a la edad de las máquinas de vapor.

Según Wiener, “existe, en la ingeniería eléctrica, una ruptura que en Alemania se conoce como la ruptura entre la técnica de las corrientes fuertes y la técnica de las corrientes débiles, y que nosotros (en los Estados Unidos o en Gran Bretaña) conocemos como la diferencia entre el poder y la ingeniería de la comunicación. Es ésta la ruptura que separa la edad que acaba de terminar de la edad en que ahora vivimos”. La ingeniería de la comunicación puede utilizar corrientes de cualquier potencia y también puede utilizar motores enormes, pero se distingue de la ingeniería del poder en que se interesa fundamentalmente en la reproducción exacta de señales y no en la manera en que se utiliza la energía.

La energía que consume una válvula electrónica posiblemente sea desperdiciada casi en su totalidad, sin embargo la válvula puede ser un medio muy eficaz de realizar una operación necesaria. Similarmente, no es posible calcular la eficiencia del trabajo de nuestro sistema nervioso desde el punto de vista de la utilización racional de la relativamente pequeña cantidad de energía que llega a las neuronas mediante la corriente sanguínea.

Los organismos están efectivamente vinculados al mundo que los rodea no

sólo mediante su metabolismo y su equilibrio metabólico y energético global, sino también mediante el flujo de las comunicaciones hacia el exterior y hacia el interior, el flujo de las impresiones recibidas y de las acciones desempeñadas. La extremadamente bien organizada y altamente diferenciada actividad neural de los hombres y los animales puede servir como un ejemplo particularmente claro de esta relación. No obstante, Wiener sostiene que es posible plantear una analogía de gran alcance entre esta actividad y el trabajo de las contemporáneas máquinas autorreguladas y de los autómatas. Las células fotoeléctricas, los receptores de luz, los sistemas radiolocalizadores, los dispositivos para el registro del potencial de los iones de hidrógeno, los termómetros, los manómetros, los micrófonos de todo tipo, etc., son los equivalentes de los órganos sensoriales y sirven como mecanismos para recibir información. Los órganos efectores de la máquina pueden ser los motores eléctricos, los solenoides, los elementos térmicos y otros dispositivos similares. Entre los mecanismos receptores y los órganos efectores de tales máquinas, como por ejemplo la contemporánea máquina calculadora electrónica, hay grupos intermediarios de elementos, un sistema central regulador que podría considerarse análogo al cerebro de los animales o del hombre.

El objeto de este sistema consiste en coordinar los mensajes que llegan, a fin de provocar en los órganos ejecutivos la reacción deseada. Además de la información que le llega a esta máquina central reguladora desde el mundo externo, ésta también recibe información sobre el funcionamiento de los órganos ejecutivos mismos. Esto es lo que se conoce como “realimentación” [*feedback*] y lo que permite el registro del cumplimiento o incumplimiento de sus propias tareas por la máquina misma. Añade Wiener: “Además, la información recibida por el autómata no necesariamente se tiene que usar de inmediato, sino que puede aplazarse o almacenarse para que esté disponible en algún momento futuro. Esto es una analogía de la memoria. Finalmente, siempre que el autómata esté funcionando, sus normas de operación mismas son susceptibles de algún cambio con base en los datos que han pasado por sus receptores, y este proceso no es disimilar al del aprendizaje”.

Así, en la transición de la edad de la máquina de vapor a la edad de la comunicación y el control, el prototipo del ente viviente se está convirtiendo en la máquina de calcular electrónica: el estudio de la nutrición cede su lugar al estudio de la fisiología del sistema nervioso central, y la energética se cambia por la cibernética, la cual es el estudio científico de la recepción, la transmisión, el almacenamiento, la transformación y la utilización de la información mediante aparatos reguladores, sean éstos de “carne y hueso o de metal”, es decir, ya sean una máquina o un organismo.

Como cualquier nueva rama del saber, la cibernética evoluciona muy rápidamente. En el muy breve periodo de su existencia ha logrado enriquecer con ideas y logros nuevos tanto a la ciencia, como especialmente a la tecnología contemporánea, en sus esfuerzos por alcanzar una automatización máxima en relación con los procesos productivos. Más aún, los últimos avances en los autómatas y en las máquinas calculadoras ya han llegado tan lejos que los resultados de los experimentos planeados o ya realizados con su ayuda pueden en muchos casos utilizarse en los intentos por alcanzar una explicación racional de los fenómenos que tienen lugar en el funcionamiento del sistema nervioso o en muchos otros procesos. El comprensible prestigio de estos éxitos, tanto como la extensa (aunque poco justificada) utilización en la cibernética de la terminología neurofisiológica, psicológica, e incluso sociológica, ha creado actualmente una situación que ha llevado a muchos pensadores contemporáneos a creer que las máquinas que pueden resolver problemas matemáticos complejos, hacer traducciones de un lenguaje a otro, y, en general, desempeñar muchas tareas que normalmente se consideran trabajos mentales, deben estar en alguna forma vivas, y, por lo tanto, han llegado a considerar que la cibernética es una vía fundamentalmente nueva y universal para la comprensión de la esencia misma de la vida.

Claro es que se equivocan. Como ya lo señalamos anteriormente, hace muchos años se intentó atribuirles vida a las máquinas. Lo único que ha cambiado es la opinión sobre cuál aspecto hay que privilegiar: el movimiento, la energética, la comunicación, o alguna otra propiedad común en los organismos y las máquinas, que sea susceptible de una explicación mediante las leyes de la física y la química. El estímulo fundamental que induce a los investigadores a atribuirles vida a las máquinas es siempre el mismo; a saber: la “intencionalidad” en la organización de los entes vivientes es lo que en principio los distingue de los objetos del mundo inorgánico. Aparte de los organismos, las máquinas son los únicos entes que muestran tal “intencionalidad” en su estructura. Por añadidura, el trabajo de las máquinas se puede entender completamente a partir de la física y la química. Esta identificación de los entes vivientes con las máquinas, por lo tanto, se veía como la única manera de salvar a la ciencia de la entelequia mística de los vitalistas, como el puente que nos llevaría de la física a la química y a la biología.

Ciertamente, podemos, y debemos, tratar de entender los fundamentos físicos y químicos de los diversos fenómenos vitales mediante la construcción y el estudio de modelos que reproduzcan, aunque en forma simplificada, los mismos fenómenos que ocurren en los organismos. Al hacerlo, sin embargo, siempre debemos recordar que son modelos y no confundirlos con entes vivientes. Nunca

debemos perder de vista las diferencias, tanto como las similitudes, entre el modelo y la cosa real. Sólo así podemos evitar la muy peligrosa sobresimplificación, así como aquellos errores que siempre le han costado mucho a la humanidad y que sólo se han podido corregir gracias a tremendos esfuerzos. A pesar de lo compleja o intrincada que pueda ser su organización, una máquina calculadora electrónica todavía está más alejada, en esencia, de un ser humano que lo que lo está, por ejemplo, una simple bacteria, a pesar de que ésta no tenga el sistema nervioso diferenciado que la máquina imita tan exitosamente.

Desgraciadamente, esta diferencia usualmente se pasa por alto en la literatura cibernética. Acaso esto sea justificable, hasta cierto punto, en el caso de que nos interesen más las normas generales de la comunicación que los sistemas particulares. Pero si el objeto de nuestros estudios es la comprensión de la naturaleza de la vida, entonces resulta en principio inadmisibles ignorar la diferencia entre los organismos y los mecanismos.

EVALUACIÓN DE LAS HIPÓTESIS MECANICISTAS CONTEMPORÁNEAS

La primera diferencia que podemos ver de inmediato entre las máquinas y los entes vivientes es la materia con que están hechos los diferentes sistemas y su naturaleza real.

Aquellos que mantienen que los entes vivientes son máquinas tienden usualmente a ignorar esta diferencia, con base en que el trabajo de una máquina depende, esencialmente, de su estructura, y no de la materia de que está hecha. Al respecto Josh ha escrito: “Podemos construir una máquina de acero o bronce y esto ciertamente influirá en su durabilidad y precisión, pero no en la naturaleza del trabajo que realiza”. Uno incluso podría construir una máquina que no fuera de metal, sino de plástico o algún otro material orgánico, haciendo así que su composición se asemejara a la composición química de un ente viviente.

Pero tales consideraciones son irracionales. El hecho de que los entes vivientes sean, en las palabras de Engels, “cuerpos albuminoides” que se componen de proteínas, ácidos nucleicos, lípidos, carbohidratos específicos, y otros diversos compuestos orgánicos, de ningún modo debe verse como una circunstancia incidental insignificante. La composición de un ente viviente es precisamente el factor que determina su carácter fluido. En particular, sólo mediante la comprensión de las muy específicas características de la estructura de las proteínas, podemos

entender las causas inmediatas que subyacen en determinadas secuencias de reacciones individuales en el metabolismo, es decir, su coordinación en el tiempo.

Cualquier sustancia orgánica puede reaccionar de muchas formas distintas; sus posibilidades químicas son enormes, pero fuera del cuerpo se muestra extremadamente “perezosa” o lenta en la explotación de tales posibilidades. Dentro del ente viviente, sin embargo, las sustancias orgánicas experimentan una transformación química extremadamente rápida. Esto se debe a las propiedades catalíticas de las proteínas. Para que una sustancia orgánica juegue un papel real en el metabolismo, es necesario que se combine químicamente con una proteína-enzima, formando con ésta un compuesto particular muy activo e inestable. Si no lo hace, sus potencialidades químicas se desarrollan tan lentamente que son insignificantes en el muy fluido proceso de la vida.

Por su especificidad extrema, las enzimas sólo forman compuestos intermedios con una sustancia en particular (su sustrato), y sólo catalizan reacciones individuales estrictamente determinadas. La frecuencia de estas reacciones dentro del cuerpo viviente, por lo tanto, puede variar muchísimo, dependiendo en primer lugar de la presencia de una serie de enzimas, así como de su actividad catalítica. Ésta puede cambiar bastante por la influencia de las circunstancias internas físicas y químicas, y también por la del medio externo. Este tipo de relación móvil entre las frecuencias de las reacciones bioquímicas individuales es de hecho un prerequisite de determinadas secuencias y concordancias de estas reacciones en la compleja red del metabolismo.

Este tipo de organización de la vida puede en cierta forma ser comparado con la organización de una pieza musical, tal como una sinfonía, cuya configuración real depende de determinadas secuencias y concordancias de sonidos individuales. Con sólo perturbar la secuencia, la sinfonía como tal se desintegra, cayendo en la desarmonía y el caos.

De manera similar, la organización de la vida depende fundamentalmente de una secuencia regular de reacciones metabólicas; y la naturaleza de la forma y la estructura de los cuerpos vivientes es fluida. Por esta razón, los organismos sólo pueden existir durante cierto tiempo gracias al continuo desarrollo de las transformaciones químicas, las cuales constituyen la esencia del vivir y cuya suspensión conduce a la desarticulación del sistema viviente y la muerte del organismo.

En cambio, la estructura básica de una máquina es estática. Cuando una máquina está en funcionamiento, sólo la fuente de energía o el combustible experimentan un cambio químico, pero la estructura misma permanece materialmente

estable, ya sea que esté hecha de metal o de plástico; mientras menos cambios sufra (por la corrosión, digamos) más habrá de durar.

Así, el principio en sí de la estabilidad que permite que un organismo o una máquina existan durante un largo periodo es diferente en ambos casos. Las similitudes entre sí que antes enumeramos son por lo tanto muy superficiales, y cuando las examinamos en detalle, parecen ser puramente formales.

Podemos demostrar lo anterior mediante el caso particular del movimiento mecánico de un organismo. En los músculos de un animal que realiza un movimiento, las fibras proteínicas se orientan de manera interrelacionada. Sin embargo, esta estructura no puede asemejarse de ningún modo a la de una máquina. En ésta los elementos estructurales no desempeñan papel alguno en la transformación química de la fuente de energía. Si las partes componentes de una máquina experimentaran ellas mismas al funcionar una transformación química, tal cosa ciertamente conduciría a la destrucción de todo el mecanismo. Por otra parte, los elementos de la construcción del cuerpo viviente, en este caso, los filamentos proteínicos, intervienen directamente en las reacciones metabólicas que constituyen la fuente de esa energía que se transforma en movimiento mecánico. Se puede decir lo mismo también, en relación con la energética, en la comparación de los organismos con los motores térmicos. Sabemos que la analogía entre la respiración y la combustión es superficial. En la combustión, la superación de la energía de activación necesaria para la realización de las reacciones de oxidación se realiza mediante un considerable aumento de la temperatura, mientras que en la respiración esto no es necesario. La respiración se basa en una disminución enzimática de la energía de la activación.

Si la transformación de la energía tuviera lugar en los organismos de la misma manera que en los motores térmicos, entonces a la temperatura en que los entes vivientes pueden vivir, el coeficiente de su actividad útil caería hasta la insignificante fracción de 1%. Este coeficiente es, de hecho, asombrosamente alto, considerablemente mayor que el que se obtiene en los motores térmicos actuales. Esto se explica por el hecho de que la oxidación del azúcar, o de cualquier otro combustible respiratorio, en el organismo, no consiste tan sólo en un acto químico, sino en una serie de reacciones individuales coordinadas en el tiempo.

Si la oxidación de los materiales orgánicos en el organismo tuviera lugar repentinamente, entonces el cuerpo viviente no sería capaz de hacer uso racional de toda la energía liberada de ese modo, especialmente si se diera en la forma de calor. En la oxidación de tan sólo una molécula-gramo de azúcar (180 gramos) se liberan cerca de 700 kilocalorías. La liberación instantánea de esta cantidad

de energía se acompañaría de un alza repentina de la temperatura, con la desnaturalización de las proteínas y la destrucción del cuerpo viviente. Este mismo efecto energético, producido por el organismo en las condiciones de baja temperatura, depende del hecho de que en el proceso de la oxidación biológica el azúcar no se convierte en dióxido de carbono y agua repentinamente, sino con lentitud, en etapas. Un proceso de este tipo no sólo aporta la posibilidad de superar, a una temperatura ordinaria, la energía de la activación, sino que también le permite al cuerpo viviente hacer uso racional de la energía que gradualmente se libera. Así, mientras mejor sea la organización del metabolismo, es decir, la coordinación entre las reacciones individuales que lo constituyen, mayor será el coeficiente de actividad útil.

El principio de evaluar los nutrientes con base únicamente en su contenido calorífico condujo a muchas dificultades para su aplicación práctica. Este principio sólo terminó por ser finalmente descartado como resultado de las investigaciones de las vitaminas y los aminoácidos esenciales, así como de las investigaciones que demostraron que, a diferencia de lo que ocurre en un motor térmico, en los organismos no sólo existe la oxidación del material energético, sino también la transformación de las estructuras proteínicas fundamentales del cuerpo viviente, las cuales son descompuestas y resintetizadas en la interacción general del organismo con el medio externo.

Finalmente, hay que señalar que también es en principio distinta la manera que utilizan para superar la energía los organismos y los mecanismos o autómatas contemporáneos. Como mostramos antes, los organismos logran evitar el “equilibrio termodinámico” precisamente porque son sistemas abiertos o fluidos. Las recientes investigaciones de la termodinámica de tales sistemas han demostrado que son esencialmente diferentes de los de la termodinámica clásica, la cual se basa en los fenómenos observados en los sistemas cerrados. Esto nos proporciona una explicación perfectamente racional de por qué la entropía no sólo no aumenta en los organismos, sino que incluso puede decrecer.

Según Wiener, un principio de otro tipo subyace en la habilidad que tienen los autómatas cibernéticos contemporáneos para contrarrestar la tendencia al aumento de entropía y crear zonas de organización a su alrededor. A fin de explicar esta habilidad, Wiener emplea la misma idea que Maxwell utilizó con sus demonios. Sin embargo, de acuerdo con las ideas actuales, este “demonio de Maxwell” está obligado a obtener incesantemente la “información” según la cual él abre o cierra la puerta a las moléculas de alta o baja frecuencia de movimiento. Durante años, el deseo vehemente de identificar al organismo con un mecanismo obligó a

muchos científicos a ignorar toda la evidencia factual acumulada y a buscar las mismas estructuras estáticas, inalterables y rígidas en el cuerpo viviente, a fin de que estas mismas estructuras pudieran verse como las portadoras de la vida.

A finales del pasado siglo muchos biólogos sostenían que la organización del protoplasma se basaba en que en éste había cierta estructura de tipo mecánico formada por “vigas y puntales” sólidos e invariables que se interconectaban entre sí. Se pensaba que lo único que nos impedía ver esta estructura era la imperfección de nuestros medios ópticos.

Al desarrollarse tales medios, sin embargo, la búsqueda de esas estructuras estáticas “determinadoras de la vida” se dedicó primero al campo de las formaciones químicas coloidales y luego al de las estructuras intramoleculares. Así surgió el concepto de que los portadores materiales de la vida se encuentran en las moléculas individuales de la sustancia hereditaria que poseen una estructura estática e invariable y que forman parte de los cromosomas nucleares. Este concepto se asocia con el trabajo de T. Morgan y sus seguidores en relación con la naturaleza genética de la vida. Según H. Muller la “molécula genética viviente” sólo puede experimentar cambios mínimos, pero es tan esencialmente estática que ha podido mantener su invariable estructura interna determinadora de la vida a través del desarrollo de la vida en la Tierra. Este concepto de la escuela morganiana de genética halló una expresión en la bien conocida obra de Schrödinger, *¿Qué es la vida?*⁶ Schrödinger vio la clave de la comprensión de la vida en el hecho de que la única estructura natural y peculiar de la vida, a saber, el gen, “es tan perdurable y constante que casi es milagroso”. Es tan invariable que parece congelado. Así, según Schrödinger, la organización de la vida se basa en el principio del “mecanismo relojero”, cuya estructura permanece totalmente constante a temperatura ambiental, tanto como a la temperatura de cero absoluto. En su conclusión, él dice: “Creo que sólo se requieren unas cuantas palabras más para revelar el punto de similitud entre un mecanismo relojero y un organismo. Éste consiste pura y sencillamente en que el organismo también depende de un sólido: el cristal aperiódico que forma la sustancia hereditaria, muy resguardado del desorden del movimiento térmico”.

Lo único que hasta la fecha se le ha añadido a la teoría del gen es el intento de darle realidad química a la previamente vaga idea de la molécula genética, sugiriendo que la molécula viviente podría ser una partícula de nucleoproteína nu-

⁶ E. Schrödinger, *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*, Cambridge University Press, Cambridge, 1944. [Fragmentos de esta obra conforman el capítulo IV de esta edición. Versión completa en español: *¿Qué es la vida?*, Tusquets, Barcelona, 1983.(E.)]

clear, o, de acuerdo con las últimas evidencias, simplemente la molécula del ácido desoxirribonucleico. Al parecer, todo lo demás en la célula debería considerarse como meramente el medio físico de la “molécula viviente”.

Desde este punto de vista, la capacidad de la autorreproducción, característica en los entes vivientes, se basa únicamente en la estructura estrictamente determinada, estática, intramolecular del ácido desoxirribonucleico (ADN), en el ordenamiento específico de los residuos de purina pirimidina mononucleótida en la cadena polinucleótida del ADN. Este ordenamiento representa, en la terminología de la cibernética, el código que almacena toda la serie de características específicas del cuerpo viviente. La transmisión de la “información hereditaria” por lo tanto puede considerarse algo así como el trabajo de una máquina estampadora en que la molécula de ADN representa la matriz que siempre reproduce una sola estructura uniforme. Semejantes hipótesis impresionan mucho a los protagonistas de la teoría mecanicista de la vida, y por lo tanto muchos físicos y biólogos contemporáneos la apoyan. Entraremos en esta cuestión más detalladamente en el curso de nuestras explicaciones posteriores. Ahora solamente es necesario comentar con brevedad el presente estado del problema. Al irse concretando más las investigaciones bioquímicas sobre la autorreproducción de los entes vivientes, más obvio está resultando que el proceso no sólo está vinculado a esta o aquella sustancia en particular, o a una de sus moléculas, sino que lo determina el sistema entero de la organización del organismo, el cual, como hemos visto, posee una naturaleza fluida y de ninguna manera se puede comparar con una máquina estampadora con una sola matriz. Al hablar sobre este tema en el Cuarto Congreso Internacional de Bioquímica, E. Chargaff comentó que, “es incluso posible que se trate de patrones en el tiempo, más que en el espacio”, dando a entender así la existencia de un orden definitivo en los procesos que ocurren en el ente viviente. En todo caso, cuando no hacemos una comparación formal entre los fenómenos que ocurren en los entes vivientes y los que ocurren en las máquinas, pero tratamos de entender cómo son realmente, no sólo encontramos similitudes, sino también una profunda diferencia en ambos tipos de sistema. Esta diferencia no es meramente fortuita, sino que constituye la esencia misma de su organización.

En primer lugar, se conecta con el hecho de que el “propósito” en que se inspira una persona para crear una máquina que necesita, nada tiene en común con la tarea de la autopreservación y la autorreproducción que determina la organización de los entes vivientes. El propósito de construir un reloj, una locomotora de vapor, o un dispositivo automático de defensa antiaérea, es el de medir el tiempo, el de transportar gente y mercancías, y el de derribar con eficacia los aviones ene-

migos. Debido a nuestra manera de pensar actual y a los hábitos tecnológicos que han evolucionado a lo largo de muchos siglos, creemos que es mucho más fácil solucionar estos problemas racionalmente mediante la construcción de estructuras estáticas de metal o de plástico, y, de hecho, es lo que hacemos.

Así, los principios mismos de la construcción de cualquier máquina que hoy exista reflejan el carácter de la persona que la hizo, su nivel intelectual y tecnológico, sus propósitos y su método para resolver los problemas que enfrentó.

Lo mismo se puede aplicar a los diversos “juguetes cibernéticos” actuales cuyo propósito es simplemente la imitación de los entes vivientes, tales como la “tortuga” de Grey Walter, el “ratón” de Shannon, el “zorro” de Ducrocq y el homeostato de Ashby, los cuales ha descrito ingeniosamente Grey Walter como “máquinas que no pueden servir para nada”. La estructura de todos necesariamente incluye la predeterminación puesta en ellos por sus constructores; P. Cossa tenía bastante razón cuando en *La cybernétique*,⁷ los describió del modo siguiente:

Lo que es interno, en el caso del ser vivo, no es solamente el medio (la readaptación), es el fin mismo: el mantenimiento de la vida, el mantenimiento de la integridad del ser por adaptación al medio exterior. Nada de parejo hay en el homeostato, no hay ninguna “finalidad interna”. Si el ser vivo, cuyo equilibrio ha sido perturbado, ensaya con obstinación, unas después de otras, todas las posibilidades de readaptación, es para sobrevivir. Si el homeostato ensaya, unas después de otras sus 390 625 combinaciones, es únicamente porque Ashby lo ha querido así.

Claro, uno puede imaginar que en el futuro habrá máquinas que serán capaces de imitar con gran precisión a los entes vivientes; máquinas diseñadas como sistemas fluidos que utilicen la energía en etapas graduales; incluso máquinas que puedan reproducirse, etc. Aun así, la organización de tales máquinas seguiría reflejando la tarea específica impuesta por sus constructores; siempre llevarían la marca de su origen.

La diferencia, en principio insuperable, entre las máquinas y los organismos, se destaca claramente cuando consideramos la cuestión del origen de los sistemas individuales. Sabemos que en su organización general, a la cual se adapta la estructura para desempeñar sus tareas específicas, una máquina se desarrolla primero en la mente de su creador, y no como un sistema físico auténtico. Esta idea

⁷ P. Cossa, *La cybernétique. Du cerveau humain aux cerveaux artificiels*, Masson, París, 1954. [Versión en español: *Cibernética. Del cerebro humano a los cerebros artificiales*, trad. de V. M. Onieva Aleixandre, Reverté, Barcelona, 1963, p. 40.]

se expresa subsecuentemente en dibujos o planos. Los planos usualmente son la base de la construcción de los componentes individuales, de acuerdo con sus especificaciones. Éstos se ensamblan y es sólo entonces cuando la máquina se convierte en un objeto físico.

La forma en que una máquina surge es, por lo tanto, perfectamente clara, pero si tratamos de solucionar el problema del origen de los entes vivientes mediante la analogía con las máquinas, inevitable y lógicamente llegaremos a una conclusión idealista.

Puede servir como un buen ejemplo de lo anterior el libro ya citado de Schrödinger. En el libro, el autor pretendió comprender la vida desde el punto de vista de la física, es decir, con base en el materialismo puro. Sin embargo, en sus conclusiones, él se vio obligado a caracterizar la vida como “la obra de arte más preciosa que se haya elaborado según los lineamientos de la mecánica cuántica del Señor”, es decir, para decirlo simplemente, él aceptó el origen divino de la vida.

Hay una diferencia formal, pero no sustancial, entre esta conclusión y las de otros intentos de solucionar el problema del origen de la vida elaborados a partir de suposiciones puramente mecanicistas sobre su naturaleza genética (por ejemplo, las de A. Dauvillier, G. Blum, L. Roka, y otros). Todos estos intentos llegan a la misma explicación esencialmente. Dentro de la solución primitiva y todavía no viviente de la sustancia orgánica, de alguna manera hubieron de aparecer partículas de proteínas, ácidos nucleicos o nucleoproteínas, y todas, repentinamente, aparecieron con una estructura intramolecular extremadamente bien adaptada a la realización de la autorreproducción y de otras funciones vitales. Así habría de surgir la “matriz viviente primigenia” que posteriormente podría ser elaborada, pero la estructura “intencional” determinante de la vida no fue en el principio necesariamente la misma que la actual. Pero entonces surge la cuestión de cuáles fueron las leyes naturales subyacentes en el origen de una estructura intramolecular adaptada a la realización de funciones específicas. El hierro puede existir en forma elemental en la naturaleza inorgánica y, en ciertas circunstancias, puede asumir la forma de una masa informe, pero, como dijo Aristóteles, una espada no puede aparecer así sin la intervención humana, pues su estructura se adapta a la realización de un objetivo particular. De la misma manera exactamente (como lo hemos de ver más adelante) las leyes físicas y químicas que eran las únicas que existían en el agua del océano primigenio, fueron más que suficientes para permitir la primera formación, en esa agua, de polímeros y polinucleótidos de tipo proteínico altamente molecular con residuos mononucleótidos más o menos irregulares. Por sí mismas, sin embargo, estas leyes no podían proporcionar la

posibilidad del desarrollo de cualquier tipo de estructuras adaptadas a la realización de funciones particulares. Los partidarios de estas hipótesis “explican”, por así decirlo, la adaptación funcional de las estructuras a sus matrices primigenias como algo debido a “una afortunada coincidencia” o a “una pura coincidencia”, en la cual Dauvillier ve justificadamente “la mano de un creador excéntrico”. Esta “mano” no difiere esencialmente de “la mecánica cuántica del Señor” de Schrödinger, y tampoco de la “divina voluntad” de san Agustín.

En su libro, cuya edición inglesa porta el muy intrigante título de *The Origins of Life* [Los orígenes de la vida],⁸ A. Ducrocq afirma haber dado una explicación general de la vida y sus orígenes basada en la “teoría cibernética” y haber demostrado las leyes de la delicada interacción de fuerzas mediante las cuales “conglomerados de átomos se transforman en agregados vivientes”, es decir, entes vivientes. Pero leyéndolo con atención encontramos que todo consiste finalmente en la afirmación de que la cadena del ADN que sirvió como punto de origen para los entes vivientes y que estaba construida de un modo específico, debió aparecer de algún modo improbable en la solución de sustancias orgánicas, pues su aparición se basaba en “una probabilidad que no era nula”. ¿En qué forma difiere esto de las numerosas hipótesis sobre el origen aleatorio de la vida que ya mencionamos?

Los físicos aseveran que es posible en principio que la mesa en la que ahora escribo sea capaz de alzarse fortuitamente en el aire por sí misma debido a la orientación simultánea en una sola dirección del movimiento térmico de todas sus moléculas. Sin embargo, sería extraño que cualquiera condujera su trabajo experimental o sus actividades prácticas en general sobre la base de tal posibilidad. Además, un científico experimental valora las teorías que proponen posibles investigaciones, ¿pero cómo investigar un fenómeno que en el mejor de los casos únicamente podría ocurrir una sola vez en el curso entero de la existencia de la Tierra? La concepción del origen aleatorio de la “molécula viviente” es, por lo tanto, totalmente infructuosa desde un punto de vista práctico, y, como veremos más adelante, también resulta teóricamente irracional.

Es indudable que los intentos conscientes o inconscientes de asemejar el origen de los entes vivientes al ensamblaje de una máquina también se encuentran en la raíz de muchos planteamientos contemporáneos que alegan que en la solución original de sustancias orgánicas se formaron varias sustancias estructuralmente adecuadas, así como bien adaptadas, para la realización de funciones vitales particulares que, subsecuentemente, mediante su combinación dieron origen

⁸ A. Ducrocq, *The Origins of Life*, Elek, Londres, 1957. [Versión original en francés: *Logique de la vie*, Julliard, París, 1956.]

al primer cuerpo viviente, justo de la misma forma en que se arma una máquina con componentes individuales cuya estructura ya está adaptada para desempeñar una tarea particular.

Según tales planteamientos, la primera cosa que sucedió, incluso antes de la aparición del organismo más primitivo, fue la formación de enzimas proteínicas con un estructura intramolecular estrictamente determinada y una adaptación muy eficiente al desempeño de ciertas reacciones catalíticas que son muy importantes en el metabolismo; de ácidos nucleicos, que juegan un papel esencial en el proceso de la reproducción de los organismos; y de otros compuestos que se encuentran en los muy eficientes, “racionalmente contruidos”, órganos del protoplasma viviente, tal como lo conocemos, aunque este mismo sólo haya surgido secundariamente por la combinación de los compuestos primarios.

Esta idea le recuerda a uno los escritos del antiguo filósofo griego Empédocles, quien creía que cuando los entes vivientes surgieron, sus órganos individuales se formaron primero de manera individual e independiente: “Por lo tanto, aparecieron multitud de cabezas sin pescuezo, brazos desnudos sin sus hombros, ojos sin frente”. Posteriormente estos miembros separados se unieron y así se formaron los diversos tipos de animales y de personas.

SÓLO ES POSIBLE COMPRENDER LA VIDA MEDIANTE EL ESTUDIO DE SU ORIGEN Y DESARROLLO

Desde el punto de vista darwiniano moderno, es obvia la falsedad, no digamos la incoherencia, de tal teoría. Cualquier órgano individual sólo puede originarse y perfeccionarse como parte del desarrollo evolutivo del organismo como un todo.

La compleja y especializada estructura del ojo o de la mano se adapta a su propósito sólo en relación con la función que desempeña. Es imposible, incluso impensable, tomar en serio la evolución de un órgano individual, tal como los empedoclianos “ojos sin frente”, porque la función misma que habría determinado su estructura no tendría significado en tales circunstancias. La acción de la selección natural, por ende, sólo puede involucrar un órgano en cuanto parte de un organismo vivo.

De la misma manera exactamente, las enzimas, ácidos nucleicos, y demás, sólo son partes del cuerpo viviente, son como órganos que desempeñan determinadas funciones vitalmente necesarias. Así, la actividad catalítica de las enzimas o las funciones específicas de los ácidos nucleicos no son importantes para las

sustancias mismas, sino que sólo son importantes para el cuerpo viviente donde tienen lugar las reacciones metabólicas particulares. Por lo tanto, cuando no son parte de tal cuerpo, antes de que éste se forme, no pueden en absoluto asumir una estructura “intencional” adecuada para el desempeño de sus funciones vitales. Es muy natural y correcto suponer que hubiera desarrollos sucesivos a partir de los organismos simples hasta los más complejos, pero, aunque los órganos individuales son más sencillos que el organismo entero, nosotros no podemos, como Empédocles, imaginar que los animales y la gente aparecieron mediante la fusión de sus órganos individuales.

Darwin demostró la forma verdadera en que los organismos superiores surgieron mediante la evolución de entes vivientes cuya organización era más sencilla, pero que en sí mismos eran ya sistemas completos.

Similarmente, sería incorrecto suponer que en el agua orgánicamente rica del océano primigenio surgieran las proteínas y los ácidos nucleicos con una estructura “intencional” extremadamente precisa y bien adaptada al desempeño de funciones biológicas particulares, y que, posteriormente, mediante su combinación, el cuerpo viviente mismo fuera creado.

Todo lo que podemos esperar de la acción de las leyes de la física y la química, las únicas que existían en la Tierra cuando la vida aún no había aparecido allí, es que se formaron más o menos al azar polímeros con una distribución aleatoria de péptidos y mononucleótidos, los cuales por lo tanto no poseían una “intencionalidad” y no estaban adaptados al desempeño de funciones específicas.

No obstante, estos polímeros pudieron unirse entre sí para formar sistemas multimoleculares completos, incomparablemente más sencillos que los cuerpos vivientes. Fue sólo como resultado de la larga evolución de estos sistemas originales, gracias a su interacción con el medio ambiente y a su selección natural, que pudieron surgir las peculiares formas de organización del cuerpo viviente, sobre todo el metabolismo, y con éste las proteínas, enzimas, ácidos nucleicos y demás sustancias complejas “intencionalmente” construidas que son características en los organismos contemporáneos. Así, no existe siquiera una remota similitud entre el origen de la vida y el ensamblaje de una máquina.

Estos dos tipos de sistema sólo muestran una similitud entre sí cuando los vemos en su estado último, distanciados de su origen. Una vez que empezamos a examinar esta cuestión, la diferencia entre la máquina y el organismo de inmediato se presenta, siendo obvio que ambos tipos de sistema son esencialmente diferentes.

Este concepto es comprensible e incluso sencillo, ya que el origen de la vida y el origen de la máquina tuvieron lugar en niveles muy distanciados del desarrollo evolutivo.

Podemos señalar las siguientes etapas importantes en este desarrollo desde el momento de la formación de la Tierra hasta nuestros días. En los primeros millones de años de su existencia, no había vida en nuestro planeta y todos los procesos que en él ocurrían sólo estaban sujetos a las leyes de la física y de la química. Esta etapa de desarrollo puede considerarse como inorgánica o abiogénica. Entonces apareció la vida en la Tierra y una nueva etapa de la evolución empezó. En este momento, nuevas leyes biológicas se sumaron a las viejas leyes físicas y químicas, y aquéllas han pasado ahora al primer plano, asumiendo una importancia creciente en el desarrollo progresivo de los entes vivientes. La culminación de este periodo fue el surgimiento del hombre, heraldado del inicio de la tercera etapa de la evolución, la social. Hoy las leyes biológicas ya no ocupan el primer plano, y las leyes del desarrollo de la sociedad humana han empezado a representar el papel principal en la evolución futura.

Resulta muy importante que con el inicio de cada nueva etapa de desarrollo, con el origen de una nueva forma del movimiento de la materia, el ritmo de la evolución aumente. El periodo abiogénico de la Tierra duró miles de millones de años, pero el progreso decisivo de la evolución biológica tan sólo requirió cientos o acaso decenas de miles de años para establecerse. El desarrollo entero de la humanidad sólo ha durado un millón de años. Se han dado transformaciones sociales a través de miles de años o aun de siglos, y hoy podemos observar claramente cambios sustanciales en la sociedad humana tras breves decenios.

Es imposible que haya habido cualquier cambio biológico significativo desde los tiempos de Aristóteles, pero tan sólo en los pasados 100 años el hombre ha alcanzado un poder hasta ahora inimaginable sobre su entorno. Puede recorrer distancias con más velocidad que un ciervo, nadar bajo el agua mejor que cualquier pez, y volar a través del aire mejor y más lejos que cualquier ave. Pero no porque haya desarrollado alas o aletas y branquias en el curso de estos años. Los poderes logrados por la humanidad no son el resultado del desarrollo biológico, sino del social. Las máquinas, en particular, que tienen un papel tan sobresaliente en la conquista de las fuerzas de la naturaleza por el hombre, son fruto de este desarrollo, ya que el hombre sólo pudo crearlas gracias a la asimilación de las experiencias acumuladas por sus antepasados a través de muchos siglos, sólo, de hecho, con base en la vida comunal de la humanidad.

Por lo tanto, las máquinas no son meramente sistemas inorgánicos que sólo

operan de acuerdo con leyes físicas y químicas. Son, por su origen, formas superiores no biológicas, es decir, formas sociales del movimiento de la materia. Por lo tanto, sólo podemos entender su naturaleza real estudiando su origen. Seguidamente examinaremos otros ejemplos a fin de que esto se aclare para el lector.

En las riberas de los grandes ríos hay formaciones sedimentarias erosionadas y allí es posible encontrar esas piedras de calcita que son comúnmente llamadas “dedos de diablo” por su extraña forma, la cual ciertamente recuerda la forma de un dedo, salvo que uno de sus extremos está afilado como un cono. En el pasado la gente creía que estos objetos habían sido formados por los rayos al caer en la arena e incluso su nombre científico —la belemita— se deriva de esta suposición sobre su origen. Si éste fuera el caso, se las debería asociar con las formaciones minerales del mundo inorgánico abiogénico. Sin embargo, de hecho se ha demostrado que las belemitas son residuos fosilizados de ciertas partes internas de los moluscos y que pertenecen a un grupo particular de moluscos cefalópodos que existieron en los periodos Jurásico y Cretáceo y ya se habían extinguido al inicio del Terciario. En la superficie de algunas belemitas a veces se puede ver rastros de los vasos sanguíneos del envoltorio del cuerpo del molusco. Así, las belemitas, consideradas por sí mismas sin referencia a su origen, sin duda carecen de vida totalmente. Desde el punto de vista de su composición química y también de sus propiedades físicas características, parecen ser objetos del mundo inorgánico. Sin embargo, las belemitas no pudieron haber sido formadas en ese mundo como resultado únicamente de las fuerzas elementales de la naturaleza inorgánica. Por esta razón, no podemos entender la naturaleza esencial de estos objetos si no sabemos algo sobre su origen biológico y sobre el desarrollo de la vida en la Tierra. Ciertamente nos parecerían milagrosos “dedos de diablo” si fueran inorgánicos.

Ahora he de pedirle al lector que me permita fantasear, pues así podré exponer mis ideas con mayor claridad.

Imaginemos que se haya logrado construir máquinas automáticas o robots que no sólo puedan desempeñar multitud de trabajos para la humanidad, sino que incluso puedan crear independientemente las condiciones energéticas necesarias para su funcionamiento, obteniendo metales y usándolos para construir componentes, y construyendo con estos nuevos robots. Entonces sobreviene en la Tierra un horrible desastre que no sólo acaba con toda la gente, sino con todos los entes vivientes de nuestro planeta. Sin embargo, los robots metálicos sobreviven. Sucesivamente siguen construyendo otros robots y así, aunque los viejos mecanismos gradualmente se gastan, surgen nuevos ejemplares y la “raza” de robots continúa vigente e incluso, acaso, crece dentro de ciertos límites.

Sigamos imaginando que todo esto ya haya sucedido en uno de los planetas de nuestro Sistema Solar, en Marte, por ejemplo, y que hayamos podido llegar allí. En su suelo sin vida y sin agua, de repente nos encontramos a los robots. ¿Tenemos que verlos como habitantes vivos del planeta? Obviamente, no. Tales robots para nosotros no pueden representar la vida, sino otra cosa. Acaso una muy compleja y eficiente forma de la organización y el movimiento de la materia, pero aun así diferente de la vida. Son análogos a las belemitas que ya hemos comentado, siendo la única diferencia que éstas surgieron en el proceso del desarrollo biológico, mientras que los robots surgieron de la forma superior, social, del movimiento de la materia.

La vida existió en el océano Jurásico y los moluscos cefalópodos desempeñaron un papel en ella. Esa vida desapareció pero las belemitas permanecieron, pareciendo ser ahora objetos sin vida del mundo inorgánico. De manera similar, las máquinas automáticas y, en particular, nuestros robots imaginarios, solamente pudieron desarrollarse como retoños de la sociedad humana (o similar a la humana), frutos de la forma social de organización y movimiento de la materia, y como tales pudieron representar un papel considerable en el desarrollo de esa forma de organización. Pero esa forma fue destruida, desapareció, y los robots ya no están bajo su control y tienen que arreglársela por sí mismos. Ahora se hallan completa y enteramente sujetos a las leyes de la física y de la química.

No obstante, del mismo modo que no se puede entender qué es una belemita si no se tienen conocimientos sobre la vida, también es imposible entender la naturaleza del “robot marciano” sin conocimientos sobre la forma social del movimiento de la materia que le dio origen. Esto seguiría siendo verdad aunque pudiéramos desarmar los componentes del robot y luego ensamblarlos correctamente. Aun entonces permanecerían ocultos para nuestro entendimiento aquellos aspectos de la organización del robot que habían sido incorporados intencionalmente para la solución de problemas que las personas que los construyeron habían tenido en algún momento, pero que para nosotros serían totalmente desconocidos.

Cuando los liliputienses encontraron un reloj en uno de los bolsillos de Gulliver, no tenían manera de entender apropiadamente su naturaleza, aunque, según Swift, los liliputienses poseían grandes conocimientos matemáticos y mecánicos. Tras prolongadas deliberaciones, decidieron que el reloj era un dios de bolsillo que Gulliver consultaba siempre que tenía que empezar a hacer algo.

Si algún “marciano pensante” por casualidad encontrara flotando en el espacio un reloj, acaso él también sería capaz de desarmarlo y de volver a armar sus

piezas, pero todavía habría muchas cosas acerca del reloj que para él serían incomprendibles. Y no sólo los marcianos, sino muchos de mis lectores probablemente serían incapaces de entender y explicar por qué en la cara de los relojes sólo hay 12 números, a pesar de que el día se divide en 24 horas. Esta pregunta sólo puede responderse a partir de un buen conocimiento de la historia de la cultura humana y, en particular, de la historia de los relojes.

Similarmente, la comprensión de la naturaleza de la vida es imposible sin el conocimiento de la historia de su origen. Usualmente, sin embargo, se ha considerado y se sigue considerando que la naturaleza y el origen de la vida son dos cuestiones completamente independientes. Así, a finales del siglo pasado y a principios del presente, el problema del origen de la vida se tildó de maldito e insoluble, alegándose que no merecía la atención de un científico serio y que su investigación era una pura pérdida de tiempo. La gente intentaba llegar a comprender la naturaleza de la vida, el problema principal de la biología hoy en día, de manera pura y primordialmente metafísica, independientemente de su origen natural. En principio, esto equivale, para decirlo con crudeza, a querer desarmar el cuerpo viviente, como si fuera un reloj, y luego volver a ensamblar las tuercas y los piñones.

Hasta Mefistófeles se burlaba de tal planteamiento en sus consejos al joven académico.

Wer will was Lebendigs erkennen und beschreiben,
Sucht erst den Geist herauszutreiben,
Dann hat er die Teile in seiner Hand,
Fehlt, leider! nur das geistige Band.
Encheiresin naturae nennt's die Chemie,
Spottet ihrer selbst und weiss nicht wie.⁹

Claro es que el análisis detallado de las sustancias y los fenómenos característicos de los entes vivientes contemporáneos es extremadamente importante y absolutamente necesario para la comprensión de la vida. Esto es indudable. La cuestión es si tal análisis, por sí mismo, es suficiente para obtener ese conocimiento. Claramente no lo es. Incluso hoy, a pesar de toda nuestra capacidad para este tipo de análisis, estamos muy lejos de poder sintetizar la vida realmente en cualquier forma, aunque admitamos que esta síntesis es en teoría perfectamente posible.

⁹ “El que quiere conocer y describir alguna cosa viviente, procura ante todo sacar de ella el espíritu; entonces tiene en su mano las partes; lo único que falta ¡ay! es el lazo espiritual que las une. *Encheiresin naturae* llama a eso la química, que, sin saberlo, se burla de sí misma.” Versión en español tomada de J. W. von Goethe, *Fausto*, trad. de J. Roviralte, 8ª ed., Cátedra, Madrid, 2001.

Esto no sólo se debe a que nuestro análisis todavía no ha concluido, a que todavía no hayamos descubierto todos los detalles de la estructura del cuerpo viviente.

Max Planck dijo: “El todo es siempre diferente de la suma de sus partes individuales”. Sólo es posible entender este todo mediante la comprensión de su maduración y de su desarrollo, mediante la investigación y la reproducción de los procesos de la gradual elaboración y perfeccionamiento de los sistemas más primitivos que fueron sus precursores.

Hoy es cada vez más obvio que el conocimiento de la naturaleza esencial de la vida sólo es posible mediante el conocimiento de su origen. Hoy, también, este origen ya no parece tan enigmático como lo parecía no hace mucho. Estamos descubriendo más y más detalles de la forma en que la vida apareció realmente en la Tierra. Sólo pudo haber sucedido como parte integral del desarrollo histórico general de nuestro planeta. Los hechos que disponemos indican que el origen de la vida fue un proceso gradual en que las sustancias orgánicas se hicieron cada vez más complejas, formando sistemas completos que estaban en un estado de continua interacción con el medio que los rodeaba.

Siguiendo de esta manera el sendero del surgimiento de la vida, no nos encontramos ni con la “mano todopoderosa del Creador”, ni con las máquinas que hicieron su aparición en una etapa muy posterior del desarrollo de la materia. Pero sí descubrimos así cómo y por qué los sistemas originales individuales que existieron, en el curso de la evolución se transformaron en unos que son característicos de la vida en vez de otros, y cómo, en ese mismo proceso del establecimiento de la vida, surgieron nuevas leyes biológicas que no habían existido antes, y, también, cómo apareció la “intencionalidad” que observamos en todos los entes vivientes.

De esta manera, nuestro saber nos da una comprensión real de la organización esencial de las formas de vida más primitivas, y, sobre esta base, nosotros podemos fácilmente identificar la subsecuente evolución de estas formas mediante la aplicación de los preceptos de la teoría de la evolución. Podemos identificar la formación de los nuevos rasgos de los entes vivientes altamente organizados, incluido el hombre, que es la culminación del estado biológico del desarrollo de la materia.

Así llegamos a la idea principal que subyace tras este libro y que ya fue formulada por Heráclito de Éfeso e incluida en los escritos de Aristóteles: “Sólo se puede entender la esencia de las cosas cuando se conoce su origen y desarrollo”.

BIBLIOGRAFÍA

- Bernard, C., *Leçons sur les phénomènes de la vie communs aux animaux et aux végétaux*, 2 tomos, Librairie J.-B. Baillière et Fils, París, 1878-1879.
- Cossa, P., *La cybernétique. Du cerveau humain aux cerveaux artificiels*, Masson, París, 1954. [Versión en español: *Cibernética. Del cerebro humano a los cerebros artificiales*, trad. de Víctor M. Onieva Aleixandre, Reverté, Barcelona, 1963.]
- Ducrocq, A., *The Origins of Life*, Elek, Londres, 1957. [Versión original en francés: *Logique de la vie*, Julliard, París, 1956.]
- Schrödinger, E., *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*, Cambridge University Press, Cambridge, 1944. [E.: Fragmentos de esta obra conforman el capítulo IV de esta edición. Versión completa en español: *¿Qué es la vida?*, Tusquets, Barcelona, 1983.]
- Tolstói, L., *О жизни* [*O žizni*, Acerca de la vida], 1886-1887.
- Wiener, N., *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, Wiley, Nueva York, 1949. [Versión en español: *Cibernética. O el control y comunicación en animales y máquinas*, trad. de F. Martín Arribas, Tusquets, Barcelona, 1985.]

Ernst Mayr

VI. ¿CUÁL ES EL SIGNIFICADO DE LA “VIDA”?*

LOS HUMANOS primitivos vivieron íntimamente ligados a la naturaleza. Como recolectores, cazadores o pastores, todos los días se ocupaban con los animales y las plantas. Y la muerte —de los niños y los viejos, de las mujeres en el parto, de los hombres en las contiendas— siempre estaba presente. Seguramente, nuestros primeros ancestros tuvieron que lidiar con la eterna pregunta “¿qué es la vida?”

Acaso, al principio, no hacían una clara distinción entre la vida en un organismo animado, y el espíritu en un objeto natural inanimado. Casi todos los pueblos primitivos creían que un espíritu podía residir en una montaña o un arroyo, tanto como en un árbol, un animal, o una persona. Esta idea animista de la naturaleza gradualmente desapareció, pero la creencia de que había “algo” en una criatura viviente que lo diferenciaba de la materia inanimada y que abandonaba el cuerpo en el momento de la muerte, permaneció firmemente arraigada. En la antigua Grecia se denominaba “aliento” a ese algo que había en los humanos. En una época posterior, particularmente en la religión cristiana, se le llamó “alma”.

Ya en tiempos de Descartes y de la Revolución científica, los animales (junto con las montañas, ríos, y árboles) habían perdido el derecho a tener un alma. Pero la división dualista entre el cuerpo y el alma en los seres humanos siguió vigente de manera casi universal y todavía hoy mucha gente cree en su existencia. Para un dualista la muerte era un problema especialmente enigmático. ¿Por qué tenía que morir o abandonar el cuerpo repentinamente el alma? ¿Cuando el alma partía del cuerpo, se iba a algún lugar, a cierto nirvana o cielo? No fue posible dar una explicación racional y científica de la muerte hasta que no desarrollara Charles Darwin su teoría de la evolución mediante la selección natural. Fue August Weismann, seguidor de Darwin a finales del siglo XIX, el primer autor en explicar que una rápida secuencia de generaciones proporciona la cantidad necesaria de nuevos genotipos para enfrentar de manera continua a un medio ambiente cam-

* Este capítulo apareció originalmente como el capítulo 1 de la obra de E. Mayr, *This Is Biology: The Science of the Living World*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997, pp. 1.23.

biante. Su ensayo sobre la muerte y el morir constituyó el principio de una nueva era en nuestra comprensión del significado de la muerte.

Sin embargo, cuando los biólogos y los filósofos hablan de la “vida”, usualmente no se refieren a la vida (es decir, el vivir) contrastada con la muerte, sino más bien a la vida contrastada con la apariencia de un objeto inanimado. La elucidación de la naturaleza de esta entidad que se denomina “vida” ha sido uno de los objetivos principales de la biología. El problema es que la “vida” sugiere “algo” —una sustancia o una fuerza— y a través de los siglos los filósofos y los biólogos han querido identificar esta sustancia vital o esta fuerza vital sin lograrlo. En realidad, el sustantivo “vida” es simplemente la cosificación del proceso de vivir. No existe como entidad independiente.¹ Uno puede plantearse científicamente el concepto del proceso del vivir, cosa que no se puede hacer con el concepto abstracto de la “vida”. Uno puede describir, incluso intentar definir, lo que es el vivir; uno puede definir el organismo viviente; y uno puede tratar de establecer la demarcación entre el vivir y el no vivir. De hecho, uno incluso puede tratar de explicar que el vivir, como proceso, puede ser el producto de moléculas propiamente no vivientes.²

La cuestión de qué es la vida y cómo se deben explicar sus procesos, ha sido objeto de acaloradas controversias desde el siglo XVI. En resumen, ésta ha sido la situación: siempre hubo un campo que afirmaba que los organismos vivientes no son en verdad diferentes de la materia inanimada; a los partidarios de este campo se les llamó mecanicistas, y posteriormente fisicistas. Y siempre hubo un campo opuesto —el de los llamados vitalistas— que por su parte afirmaba que los organismos vivientes tienen propiedades que no se encuentran en la materia inerte y que por ende las teorías y los conceptos de la biología no pueden reducir-

¹ La búsqueda es todavía más fútil si se sustituye “vida” por los términos “mente” o “conciencia”. Se utilizó esta sustitución para facilitar la demarcación entre la vida humana y la vida de los animales, pero resultó ser una estrategia fallida porque no existe una definición de la mente ni de la conciencia que sea aplicable tan sólo a los humanos, excluyendo a todos los animales.

² En el siglo pasado se hicieron muchos intentos por definir con una sola frase “el vivir” o “la vida”, algunos basados en la psicología, otros en la genética, pero ninguno resulta totalmente satisfactorio. Lo que sí ha tenido éxito es la descripción cada vez más precisa y completa de todos los aspectos del vivir. Uno podría decir que “vivir consiste en todas las actividades de los sistemas autoconstruidos controladas por un programa genético”. B. Rensch afirma en su libro *Biophilosophy*: “Los organismos vivientes son sistemas abiertos jerárquicamente ordenados que se componen principalmente de moléculas orgánicas, las cuales consisten normalmente en individuos estrictamente delimitados y de breve existencia compuestos de células”. R. Sattler dice que un sistema viviente puede definirse “como un sistema abierto que se autorreproduce, se autorregula, muestra individualidad y se nutre con la energía del medio ambiente” (*Biophilosophy*, Springer, Berlín, 1986, p. 228). Estas definiciones son más descriptivas que definitorias; contienen afirmaciones innecesarias y omiten referencias al programa genético, acaso el aspecto más característico de los organismos vivientes.

se a las leyes de la física y la química. En algunos periodos y en ciertos centros intelectuales, a veces los fisicistas parecieron ser los ganadores, y a veces los vitalistas, en otros periodos y lugares. En este siglo se ha visto que ambos campos tenían parcialmente la razón y ambos estaban en parte equivocados.

Los fisicistas habían tenido la razón al insistir en que no existe un componente de la vida metafísico y que se puede explicar la vida en el nivel molecular según principios físicos y químicos. Mientras que los vitalistas habían tenido la razón en aseverar que los organismos vivientes no son iguales a la materia inerte sino que poseen numerosas características autónomas, particularmente un programa genético históricamente adquirido, que no existen en la materia inanimada. Los organismos son sistemas ordenados con muchos niveles y son muy distintos a cualquier cosa que se pueda encontrar en el mundo inanimado. La filosofía que finalmente incorporó los mejores principios del fisicismo y del vitalismo (tras descartar sus excesos) fue llamada organicismo; éste es el paradigma dominante hoy.

LOS FISICISTAS

En la filosofía de diversos pensadores griegos, incluidos Platón, Aristóteles, Epicuro, y otros, tuvo inicio la explicación natural (contraria de la sobrenatural) del mundo. Tales prometedoras primicias, sin embargo, se olvidaron en gran medida durante los siguientes siglos. En la Edad Media predominó una estricta adherencia a las enseñanzas de las Escrituras, que atribuían la existencia de todo en la naturaleza a Dios y sus leyes. Pero el pensamiento medieval también se caracterizaba por la creencia en todo tipo de fuerzas ocultas. Con el tiempo, una nueva manera de ver el mundo, adecuadamente llamada “la mecanización de la idea del mundo”,³ redujo, si no eliminó, la importancia de esta forma de pensar animista, mágica.

³ Los historiadores A. Maier (*Die Mechanisierung des Weltbildes im 17. Jahrhundert*) y E. J. Dijksterhuis (*De mechanisering van het wereldbeeld*) han descrito de manera espléndida este cambio gradual desde los griegos hasta —a través de la “época oscura” y la filosofía escolástica—, finalmente, los inicios de la Revolución científica, cambio donde se destacan los nombres de Copérnico, Galileo y Descartes. Ambos historiadores han descrito las múltiples influencias en este desarrollo, así como lo que en éste se retuvo de la tradición griega. Por ejemplo, “el apasionado esfuerzo de la ciencia física clásica por identificar lo inmutable detrás de la variabilidad de todos los fenómenos” (Dijksterhuis), es decir, el esencialismo. “La idea fundamental de toda la filosofía [de Platón] es que las cosas que nosotros percibimos son únicamente copias imperfectas, imitaciones o reflejos de las formas ideales o las ideas” (Dijksterhuis). En el desarrollo de estas ideas, evidentemente la influencia de Platón fue mayor que la de Aristóteles. Fue Platón el que “de manera entusiasta avaló el principio pitagórico [...] como el germen de

Fueron múltiples las influencias que condujeron a la mecanización del mundo. Éstas no solamente consistieron en las enseñanzas de los filósofos griegos, divulgadas por los árabes, junto con los redescubiertos escritos originales, en el mundo occidental, sino también en los desarrollos tecnológicos del Medievo final y del Renacimiento inicial. En aquellos tiempos los relojes y otros autómatas —de hecho, casi cualquier tipo de máquina— ejercían una gran fascinación sobre la gente. Todo culminó en Descartes y su aserción de que todos los organismos vivientes, excepto los humanos, no eran *más que* máquinas.

Descartes (1596-1650) se convirtió en el portavoz de la Revolución científica, la cual, con su anhelo de la precisión y la objetividad, no podía aceptar las ideas vagas, empapadas de metafísica y de magia sobrenatural, tales como la existencia del alma en los animales y en las plantas. Delimitando la posesión del alma a los humanos y declarando que los animales no eran más que autómatas, Descartes cortó el nudo gordiano, por así decirlo. Mediante la mecanización del alma animal, Descartes completó la mecanización de la idea del mundo.⁴

Resulta un poco difícil entender por qué el concepto de los organismos como máquinas pudo haber tenido una popularidad tan duradera. Al fin y al cabo, ninguna máquina ha podido jamás construirse a sí misma, reproducirse, programarse, o procurarse la propia energía. La similitud entre un organismo y una máquina es excesivamente superficial. No obstante, este concepto no murió del todo hasta muy avanzado el presente siglo.

El éxito de Galileo, Kepler y Newton en la utilización de las matemáticas para reforzar sus descripciones del cosmos, también contribuyó a la mecanización de

la matematización de la ciencia". "Platón hace del cosmos un ser viviente infundiendo un alma al cuerpo del mundo" (Dijksterhuis).

⁴ A decir verdad, es ésta una exposición algo simplista del camino mediante el cual Descartes llegó a sus conclusiones. La historia se remonta a las enseñanzas aristotélicas, las aceptadas por los filósofos escolásticos, que dicen que las plantas poseen un alma nutritiva y los animales un alma sensible. Se le asignaba sustancia material al alma sensible de los animales, mientras que el alma racional era inmortal. Estas capacidades del alma sensible de los animales se limitaban a las percepciones sensoriales y a la memoria. Por sus escritos es claro que Descartes entendía como alma (racional) la "conciencia reflexiva del ser y del objeto del pensamiento". Adscribir a los animales la capacidad del pensamiento racional equivalía a otorgarles un alma inmortal, y eso para Descartes era inadmisible porque significaría que su alma ascendería al cielo —la idea ateísta de que acaso tampoco había un cielo para las almas humanas al parecer jamás se le ocurrió a Descartes—. Los razonamientos de Descartes se basaban en las definiciones escolásticas de la sustancia y la esencia, que descartaban la existencia del alma en los animales y la limitaban a los humanos racionales y pensantes. Esta conclusión eliminaba la inaceptable posibilidad de que los animales tuvieran un alma inmortal que subía al cielo tras la muerte (L. C. Rosenfield, *From Beast-Machine to Man-Machine*, pp. 21-22). Si uno podía negarle el alma a los animales, era obvio, por necesidad, que no se podía aceptar la creencia, todavía muy extendida en Europa en el siglo XVII, de que un alma, ánima o *vita mundi* impregnaba el universo.

la idea del mundo. Galileo, en *Il saggiatore*,⁵ expuso sucintamente el prestigio de las matemáticas en el Renacimiento cuando dijo que “no puede entenderse [el libro de la naturaleza] a menos que antes se haya comprendido su lenguaje y aprendido su alfabeto. Está escrito en el lenguaje de las matemáticas y sus caracteres son triángulos, círculos y otras figuras geométricas, sin los cuales es humanamente imposible comprender una sola de sus palabras. Sin ese lenguaje, navegamos en un oscuro laberinto”.

El rápido desarrollo de la física poco tiempo después significó un paso adelante que condujo a la Revolución científica a convertir el mecanicismo más generalizado del periodo inicial en un fisicismo más específico, basado en una serie de leyes concretas sobre el funcionamiento tanto de las estrellas como de la Tierra.⁶

El movimiento fisicista tuvo el enorme mérito de refutar gran parte del pensamiento mágico que había caracterizado en general a los siglos precedentes. Acaso su mayor logro fue proporcionar una explicación natural de los fenómenos físicos, eliminando así gran parte de la anterior dependencia en lo sobrenatural de casi toda la gente. Si el mecanicismo, y particularmente su conversión en fisicismo, se extremaron a veces, fue porque resultaba inevitable en un nuevo movimiento pleno de energía. Pero por su unilateralidad y por su fracaso en explicar cualquiera de los fenómenos y procesos peculiares en los organismos vivientes, el fisicismo propició una rebelión. Este movimiento de oposición usualmente se describe con el término global de vitalismo.

Desde Galileo hasta los tiempos modernos, la biología ha fluctuado entre las explicaciones estrictamente mecanicistas y las mayormente vitalistas. Finalmente, el cartesianismo llegó a su culminación con *L’homme machine* de La Mettrie.⁷ Luego siguió un florecimiento vigoroso del vitalismo, particularmente en Francia y en Alemania, pero los triunfos subsecuentes de la física y la química a mediados del siglo XIX inspiraron todavía otro resurgimiento fisicista en la biología. Éste se limitó sobre todo a Alemania, lo cual acaso no es sorprendente, ya que en ninguna otra parte floreció tanto la biología durante el siglo XIX.

⁵ Galileo Galilei, “The Assayer”, en Galileo Galilei *et al.*, *The Controversy on the Comets of 1618*, trad. de S. Drake y C. D. O’Malley, University of Pennsylvania Press, Filadelfia, 1960.

⁶ El concepto del mecanicismo se utilizó en dos sentidos diferentes a través del siglo XIX y parte del siglo XX. Por un lado se relacionaba con los puntos de vista de aquellos que negaban la existencia de cualesquier fuerzas sobrenaturales. Para los darwinianos, por ejemplo, significaba la negación de la existencia de cualquier teleología cósmica. Sin embargo, para otros el significado principal del concepto del mecanicismo era que no hay diferencia alguna entre los organismos y la materia inanimada, que no existe tal cosa como los procesos específicamente vivientes. Para los fisicistas éste fue el significado principal del mecanicismo.

⁷ J. O. de La Mettrie, *L’homme machine*, Elie Luzac, Leiden, 1748.

EL FLORECIMIENTO DEL FISICISMO

El movimiento fisicista del siglo XIX apareció en dos olas. La primera fue una reacción contra el vitalismo moderado de Johannes Müller (1801-1858), quien en el decenio de 1830 pasó de la fisiología pura a la anatomía comparada, y de Justus von Liebig (1803-1873), famoso por sus incisivas críticas, las cuales impulsaron el derrocamiento del reinado del inductivismo. Esta ola se inició por cuatro antiguos discípulos de Müller: Hermann von Helmholtz, Emil du Bois-Reymond, Ernst Brücke y Matthias Schleiden. La segunda ola, que empezó alrededor de 1865, se identifica con los nombres de Carl Ludwig, Julius von Sachs y Jacques Loeb. Es indudable que todos estos fisicistas hicieron importantes contribuciones a la fisiología. Helmholtz (así como Claude Bernard en Francia) eliminó la connotación vitalista del “calor animal”, y Du Bois-Reymond disipó gran parte del misterio de la fisiología neurológica mediante una explicación física (eléctrica) de la actividad neurológica. Schleiden produjo avances en los campos de la botánica y la citología mediante su empeño en demostrar que las plantas se componen totalmente de células, siendo todos sus diversos elementos estructurales, células o productos de células. Helmholtz, Du Bois-Reymond y Ludwig sobresalieron particularmente en la invención de instrumentos cada vez más complejos para registrar las precisas medidas que les interesaban. Esto les permitió, entre otros logros, desechar la existencia de una “fuerza vital” mediante la demostración de que el trabajo podía transformarse en calor sin dejar residuos. Todas las historias de la fisiología que desde esos tiempos se han escrito documentan estos y otros espléndidos logros.

No obstante, la filosofía subyacente en esta escuela fisicista era bastante ingenua, tanto que hubo de provocar el desprecio de los biólogos que estudiaban la historia natural. En los registros históricos de los muchos logros de los fisicistas, con frecuencia ha sido pasada por alto su ingenuidad respecto a los procesos vivos. Pero no se puede entender la apasionada resistencia de los vitalistas a los planteamientos de los fisicalistas a menos que se conozcan verdaderamente los planteamientos de los fisicistas.

Resulta irónico que los fisicistas atacaran a los vitalistas por haber propuesto una “fuerza vital” no analizada, y sin embargo también utilizaran ellos mismos factores no analizados como la “energía” y los “movimientos”. Las definiciones de la vida y las descripciones de los procesos vivos que formularon los fisicistas con frecuencia consistían en afirmaciones totalmente insustanciales. Por ejem-

plo, el químico físico Wilhelm Ostwald dijo que un erizo de mar, al igual que cualquier objeto inerte, era “una suma cohesiva espacialmente discreta de cantidades de energía”. Para muchos fisicistas, una afirmación vitalista inaceptable se convertía en aceptable cuando la fuerza vital era remplazada con el término igualmente indefinido de “energía”. Wilhelm Roux,⁸ cuyas investigaciones indujeron al florecimiento de la embriología experimental, afirmaba que el desarrollo es “la producción de la diversidad por causa de la distribución desigual de la energía”.

Más popular todavía que la “energía” era el concepto del “movimiento” para explicar los procesos vivientes, incluidos los de la adaptación y el desarrollo. E. du Bois-Reymond⁹ aseveró que la comprensión de la naturaleza “consiste en explicar todos los cambios del mundo como producciones del movimiento de los átomos”, es decir, “reduciendo los procesos naturales a la mecánica de los átomos [...] Mostrando que los cambios en los cuerpos naturales pueden explicarse como una suma constante [...] de energía potencial y cinética, no hay nada más que se tenga que explicar sobre estos cambios”. Sus contemporáneos no observaron que tales aseveraciones sólo consistían en palabras vacuas sin una evidencia sustancial y con un valor explicativo mínimo.

La importancia del movimiento de los átomos no sólo la planteaban los fisicistas, sino aun algunos de sus opositores. Para Rudolf von Kölliker¹⁰ —un citólogo suizo que pensaba que los cromosomas en el núcleo se implican en la herencia y que los espermatozoides son células— el desarrollo era un fenómeno estrictamente físico controlado por las diferencias en los procesos de crecimiento: “Es suficiente postular la aparición en los núcleos de movimientos regulares y típicos controlados por la estructura del idioplasma”.

Como lo ejemplifican los escritos del botánico Karl von Nägeli,¹¹ otra de las explicaciones preferidas de los mecanicistas consistía en invocar “los movimientos de las partes mínimas” a fin de elucidar “la mecánica de la vida orgánica”.¹² El

⁸ W. Roux, *Gesammelte Abhandlungen über Entwicklungsmechanik der Organismen*, 2 vols., Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1895.

⁹ E. du Bois-Reymond, *Über die Grenzen des Naturerkennens*, Veit & Co., Leipzig, 1872.

¹⁰ R. von Kölliker, *Das Karyoplasma und die Vererbung: eine Kritik der Weismann'schen Theorie von der Kontinuität des Keimplasma*, Leipzig, 1886.

¹¹ K. von Nägeli, *Mechanisch-physiologische Theorie der Abstammungslehre*, R. Oldenbourg, München-Leipzig, 1884.

¹² K. von Nägeli dice que se debe postular, respecto a los términos específicos que se usen en una explicación, “que se expresen general y absolutamente, y en la forma de un movimiento” (“Über die gegenwärtige Aufgabe der Naturgeschichte, insbesondere der Botanik”, *Zeitschrift für Wissenschaftliche Botanik*, 1-2: 1). Rawitz —según W. Roux, “Das Wesen des Lebens”, en P. Hinneberg (ed.), *Kultur der Gegenwart. Ihre Entwicklung und ihre Ziele*, B. G. Teubner Verlag, Leipzig, 1913, pp. 173-187— define la vida

efecto de un núcleo en el resto de la célula —el citoplasma— según E. Strasburger, un botánico principal de la época, era “la propagación de movimientos moleculares [...] en una forma que podría compararse con la de la transmisión de un impulso nervioso”. Por ende, no involucraba la transportación de sustancias. Esta idea era totalmente errónea, claro. Aquellos físicos jamás se dieron cuenta de que sus afirmaciones sobre la energía y el movimiento en realidad no explicaban nada. Los movimientos, a menos que estén dirigidos, son aleatorios, al igual que el movimiento browniano. Algo tiene que dirigir los movimientos, y esto es lo que sus oponentes los vitalistas siempre subrayaron.

La ineficacia de una interpretación puramente física era particularmente obvia en las explicaciones de la fertilización. Cuando E. Miescher (un discípulo de Strasburger y de Ludwig) descubrió el ácido nucleico en 1869, él pensó que la función del espermatozoide era la puramente mecánica de iniciar la división celular; una consecuencia de su enfoque físico fue que Miescher no percibió la trascendencia de su propio descubrimiento. Jacques Loeb aseveraba que los agentes realmente cruciales en la fertilización no eran las nucleínas en el espermatozoide, sino los iones. Casi nos avergüenza leer su afirmación de que el “*Branchipus* es un crustáceo de agua dulce que si se cultiva en una solución salina concentrada pierde tamaño y experimenta otros cambios. En este caso se le llama artemia”. La maestría química de los físicos, en particular la química física, no tenía un parangón en sus conocimientos biológicos. Hasta Sachs, que estudió tan diligentemente los efectos de diversos factores extrínsecos en el crecimiento y la diferenciación, al parecer jamás reflexionó en la cuestión de por qué las semillas de distintas especies de plantas cultivadas en condiciones idénticas de iluminación, riego y nutrición, producen especies totalmente diferentes.

Acaso la escuela mecanicista más intransigente de la biología moderna fue la *Entwicklungsmechanik*, fundada en el decenio de 1880 por Wilhelm Roux. Esta escuela de embriología representaba una reacción rebelde contra la unilateralidad de la embriología comparativa que sólo se interesaba en las cuestiones filogenéticas. El embriólogo Hans Driesch, que trabajaba con Roux, era todavía más mecanicista que éste al principio, pero con el tiempo experimentó una completa conversión desde el mecanicismo extremo hasta el vitalismo extremo. La causa fue un experimento donde él dividió un embrión de erizo de mar, que se encontraba en la etapa de dos células, en dos embriones individuales unicelulares, y observó que estos dos embriones no se convertían en dos organismos a medias,

como “una forma especial de movimientos moleculares, y todas las manifestaciones de la vida son variantes de los mismos”.

como sus teorías mecanicistas lo exigían, sino que habían sido capaces de compensar adecuadamente su nueva condición, convirtiéndose en larvas de menor tamaño, pero en todo lo demás perfectas.

Tuvo que llegar el tiempo en que la vacuidad e incluso la absurdidad de estas explicaciones se hicieran obvias para la mayoría de los biólogos, quienes, sin embargo, usualmente se contentaban con adoptar la posición agnóstica de que los organismos y los procesos vivientes simplemente no se podían explicar totalmente mediante el fisicismo reduccionista.

LOS VITALISTAS

A los vitalistas, desde el periodo de la Revolución científica hasta bien avanzado el siglo XIX, les inquietó el problema de explicar la “vida”. No se convirtió realmente en materia de análisis científico hasta el auge de la biología tras el decenio de 1820. Descartes y sus seguidores no habían podido convencer a la mayoría de los investigadores de las plantas y los animales, de que no eran esencialmente diferentes los organismos vivientes y la materia inanimada. Pero tras el auge del fisicismo, los naturalistas tuvieron que examinar nuevamente la naturaleza de la vida y que impugnar *científicamente* (en vez de metafísica o teológicamente) la teoría mecanicista de los organismos propuesta por Descartes. Tal actitud condujo al nacimiento de la escuela vitalista de la biología.¹³

Fueron diversas las reacciones de los vitalistas ante los planteamientos fisicistas, ya que el paradigma propiamente fisicista era un compuesto teórico, no sólo en lo que planteaba (que los procesos vivientes son mecánicos y pueden reducirse a las leyes físicas y químicas) sino también en lo que no era capaz de abarcar (las diferencias entre los organismos vivientes y la materia simple; la existencia de propiedades de adaptación mucho más complejas —la *Zweckmäßigkeit* (finalismo)

¹³ Casi todas las historias actuales del vitalismo son algo unilaterales, ya que fueron escritas por vitalistas como H. Driesch —*Der Vitalismus als Geschichte und als Lehre*, J. A. Barth, Leipzig, 1905— o por sus oponentes, quienes no veían nada valioso en esta teoría. Acaso la mejor explicación del vitalismo es la de T. S. Hall —*Ideas of Life and Matter: From the Enlightenment to the End of the Nineteenth Century*, 2 vols., The University of Chicago Press, Chicago, 1969, capítulos 28-35—; la de G. Blandino —*Theories on the Nature of Life*, Philosophical Library, Nueva York, 1969— enfoca la aportación de Driesch, y E. Cassirer —*The Problem of Knowledge: Philosophy, Science, and History after Hegel*, Yale University Press, New Haven, 1950— también enfoca la aportación de Driesch, de sus seguidores y oponentes; la concisa exposición de F. Jacob —*The Logic of Life: A History of Heredity*, Pantheon, Nueva York, 1973— es equilibrada y relata el desarrollo del vitalismo a partir del animismo. Pero aún no existe una historia realmente completa y equilibrada del vitalismo.

kantiana— en los animales y en las plantas; y las explicaciones evolucionistas). Todos estos planteamientos u omisiones fueron criticados por algún oponente del fisicismo. Ciertos vitalistas enfocaban las propiedades vitales no elucidadas, otros la naturaleza holística de las criaturas vivientes, aun otros la adaptabilidad o la direccionalidad (por ejemplo, en el desarrollo del óvulo fertilizado).

A todos estos cuestionamientos de los diversos aspectos del fisicismo se les ha calificado tradicionalmente de vitalismo. En cierto sentido, esto no es totalmente erróneo porque los antifisicistas defendían las propiedades específicamente vitales de los organismos vivientes. Sin embargo, la etiqueta de vitalismo oculta la heterogeneidad de este grupo.¹⁴ Por ejemplo, en Alemania algunos biólogos (a quienes Lenoir llama teleomecanicistas) estaban dispuestos a explicar los procesos fisiológicos mecánicamente, aunque señalaban que así no se aclaraba ni la adaptación ni los procesos dirigidos, tales como el desarrollo del óvulo fertilizado. Estas legítimas cuestiones fueron planteadas una y otra vez por filósofos y biólogos distinguidos desde 1790 hasta el final del siglo XIX, pero fue mínimo su efecto en la obra de los fisicistas de avanzada, tales como Ludwig, Sachs o Loeb.

El vitalismo, desde su aparición en el siglo XVII, fue un antimovimiento. Constituía una rebelión contra la filosofía mecanicista de la Revolución científica y contra el fisicismo que había existido desde Galileo hasta Newton. Rechazaba apasionadamente la doctrina de que el animal no es más que una máquina y de que todas las manifestaciones de la vida pueden ser exhaustivamente explicadas como el movimiento de la materia. Pero así como se mostraron resueltos y convincentes en su rechazo del modelo cartesiano, también se mostraron indecisos y dudosos en sus propios planteamientos. Había una gran diversidad de explicaciones, pero no había una teoría cohesiva.

La vida, según un grupo vitalista, se vinculaba ya sea con una sustancia especial (por ellos llamada protoplasma) que no se encontraba en la materia inanimada; ya sea con un estado especial de la materia (tal como el estado coloidal), que según ellos no podían analizar las ciencias fisicoquímicas por carecer de los aparatos para hacerlo. Otro subgrupo vitalista sostenía que hay una fuerza vital especial (a veces llamada *Lebenskraft*, *Entelechie*, o *élan vital*) distinta a las conocidas por los fisicistas. Algunos de los que aceptaban la existencia de tal fuerza también eran teleogistas que creían que la vida tenía una finalidad suprema. Otros autores mencionaban fuerzas psicológicas o mentales (el psicovitalismo, el psicola-

¹⁴ Como T. Lenoir —*The Strategy of Life: Teleology and Mechanics in Nineteenth-Century German Biology*, D. Reidel, Dordrecht, 1982— lo ha señalado correctamente.

marckismo) a fin de explicar ciertos aspectos de los organismos vivientes que los fisicistas no habían sido capaces de explicar.

Los vitalistas que creían en la existencia de una fuerza vital tenían muy diversas opiniones sobre la naturaleza de ésta. Desde aproximadamente mediados del siglo XVII, éstos caracterizaron el agente vital como un fluido (no un líquido) análogo a la gravedad de Newton y a otros “fluidos imponderables” como el calórico y el flogisto. La gravedad es invisible, y también el calor que fluye de un objeto caliente a otro frío; por lo tanto, no se consideraba perturbador o improbable que el fluido vital fuera asimismo invisible, aunque no necesariamente sobrenatural. Por ejemplo, el influyente naturalista alemán de finales del siglo XVIII, J. F. Blumenbach (que escribió extensamente sobre la extinción, la creación, las catástrofes, la mutabilidad y la generación espontánea) consideraba que este fluido vital, aunque invisible, era sin embargo muy real y sería posible investigarlo científicamente, al igual que la gravedad.¹⁵ El concepto de un fluido vital fue más adelante remplazado por el de una fuerza vital. Hasta un científico de gran reputación como Johannes Müller pensaba que una fuerza vital era indispensable para explicar las manifestaciones de otro modo inexplicables de la vida.

En Inglaterra, todos los fisiólogos de los siglos XVI, XVII y XVIII tenían ideas vitalistas y el vitalismo aún se mostraba pujante durante el periodo de 1800-1840 en los escritos de J. Hunter, J. C. Prichard y otros. No sorprende que en Francia, donde el cartesianismo había sido particularmente intenso, la contracorriente de los vitalistas fuera equivalentemente vigorosa. Sus representantes más notables fueron la escuela de Montpellier (un grupo de médicos y fisiólogos) y el histólogo F. X. Bichat. Aun Claude Bernard, que estudió cuestiones de funcionalidad orgánica, tales como los sistemas digestivo y nervioso, y que se consideraba un oponente del vitalismo, en realidad apoyó diversas nociones vitalistas. Además, la mayoría de los lamarckianos eran bastante vitalistas en sus ideas.

Fue en Alemania donde el vitalismo tuvo el mayor florecimiento y alcanzó la máxima diversidad. Georg Ernst Stahl, un químico y médico de finales del siglo XVII, mejor conocido por su teoría del flogisto (la combustión), fue el primer gran oponente de los mecanicistas. Acaso fue más animista que vitalista, pero sus ideas desempeñaron un importante papel en la doctrina de la escuela de Montpellier.

¹⁵ “De hecho, varias formas del vitalismo representan extensiones muy legítimas con medios newtonianos del programa cartesiano en la biología mecanicista”: P. McLaughlin, “Newtonian Biology and Kant’s Mechanistic Concept of Causality”, en G. Funke (comp.), *Akten des 7. Internationalen Kant-Kongresses*, vol. II, Bouvier Verlag, Bonn, 1991, pp. 57-66.

En Alemania, el siguiente impulso al movimiento vitalista fue esa controversia de la preformación *versus* la epigénesis que predominó en la biología del desarrollo durante la segunda mitad del siglo XVIII. Los partidarios de la preformación sostenían que las partes del organismo de un adulto existen en forma mínima en el mismo inicio del desarrollo. Los epigenesistas alegaban que las partes adultas son producto del desarrollo y no existen como partes del organismo inicialmente. En 1759, cuando el embriólogo Caspar Friedrich Wolff refutó la preformación y optó por la epigénesis, tuvo que invocar un agente causal que transformaría la masa no formada del óvulo fertilizado en un adulto de una especie. Él llamó a este agente la *vis essentialis*.

J. F. Blumenbach rechazó la vaga *vis essentialis* y propuso en cambio que una fuerza formativa específica, *nisus formativus*, tiene un papel decisivo no sólo en el desarrollo del embrión, sino también en el crecimiento, la regeneración y la reproducción. También pensaba que todavía otras fuerzas, tales como la irritabilidad y la sensibilidad, contribuían al mantenimiento de la vida. Blumenbach era muy pragmático respecto a estas fuerzas, considerándolas esencialmente denominaciones de procesos observados cuyas causas él ignoraba. Las veía como cajas negras, más que como principios metafísicos.

La rama de la filosofía alemana llamada *Naturphilosophie*, propuesta por F. W. J. Schelling y sus partidarios a principios del siglo XIX, era un vitalismo decididamente metafísico, pero la filosofía práctica de biólogos profesionales como Wolff, Blumenbach, y con el tiempo Müller, era antifisicista, más que metafísica. A Müller se le había difamado injustamente con la acusación de que era un metafísico poco científico. Coleccionista de mariposas y plantas desde la niñez, Müller había adquirido el hábito naturalista de observar holísticamente a los organismos. Sus discípulos, más inclinados a las matemáticas y a las ciencias físicas, carecían de esta capacidad. Müller se dio cuenta de que el eslogan “la vida es un movimiento de partículas” no tenía ni sentido ni valor explicativo, y su concepto alternativo de la *Lebenskraft* (fuerza vital), aunque erróneo, se aproximaba más al concepto de un programa genético que las superficiales explicaciones fisicistas de sus estudiantes rebeldes.¹⁶

¹⁶ La similitud que el concepto de *Lebenskraft* de Müller habría de tener con el concepto del programa genético puede ejemplificarse con algunas citas: “La *Lebenskraft* de Müller actúa en todos los órganos como la causa y supremo efector de todos los fenómenos según un plan definido (programa)” (E. du Bois-Reymond, “Gedächtnissrede auf Johannes Müller”, en *Abhandlungen der Königlich Akademien der Wissenschaften zu Berlin* 1859, pp. 25-191). Ciertas partes de la *Lebenskraft*, “representando todo el conjunto, se transmiten durante la reproducción, sin incurrir en ninguna pérdida, a todo los gérmenes, donde pueden permanecer latentes hasta la germinación” (*ibid.*). Los cuatro atributos principales de la

Muchos de los planteamientos de los vitalistas tenían el propósito de explicar las características específicas de los organismos que hoy describe el programa genético. Propusieron diversas refutaciones perfectamente válidas de la teoría mecanicista, pero no fueron capaces, debido al estado rudimentario de la teoría biológica en sus tiempos, de encontrar la explicación correcta de procesos vitales que con el tiempo se descubrieron en el siglo xx. Consecuentemente, casi todos los argumentos de los vitalistas eran negativos. Desde el decenio de 1890 en adelante, Driesch alegaba, por ejemplo, que el fisicismo no podía explicar la autorregulación en las estructuras embrionarias, la regeneración y la reproducción, y los fenómenos psíquicos como la memoria y la inteligencia. Sin embargo, resulta extraordinario con cuánta frecuencia frases perfectamente sensatas aparecen en los escritos de Driesch, siempre que su término *Entelechie* se remplace con la frase “programa genético”. Aquellos vitalistas no sólo sabían que algo le faltaba a las explicaciones mecanicistas, sino que pudieron describir en detalle la naturaleza de los fenómenos y procesos que los mecanicistas no pudieron explicar.¹⁷

Dadas las debilidades e incluso las contradicciones en las explicaciones vitalistas, puede parecer sorprendente la amplia aceptación y vigencia del vitalismo en su época. Una razón de ello, como hemos visto, es que por entonces simplemente no había otra alternativa a la reduccionista teoría mecanicista de la vida, la cual para muchos biólogos era claramente inaceptable. Otra razón es que varias otras ideologías por entonces dominantes apoyaban el vitalismo, incluida la creencia en una voluntad cósmica (teleología o finalismo). En Alemania, Immanuel Kant influyó mucho en el vitalismo, particularmente en la escuela del paralelismo teleomecánico, influencia que se observa en los trabajos de Driesch. Una fuerte vinculación con el finalismo es evidente en la obra de la mayoría de los vitalistas.¹⁸

Lebenskraft registrados por Müller, efectivamente equivalen a características del programa genético: 1) no estar localizados en un órgano específico; 2) ser divisibles en muchísimas partes, todas las cuales siguen conservando las propiedades del conjunto; 3) desaparecer tras la muerte sin dejar un remanente (no existe un alma que se desprenda), y 4) actuar de acuerdo con un plan (poseer propiedades teleonómicas). Yo he querido exponer las ideas de Müller a fin de corregir las vacuas descripciones de ciertos fisicistas como Du Bois-Reymond, que difamó a Müller diciendo que era un metafísico poco científico.

¹⁷ J. J. von Uexküll, B. Dürken, K. M. Meyer-Abich, W. E. Agar, R. S. Lillie, J. S. Haldane, E. S. Russel, W. McDougall, P. L. du Noüy y E. W. Sinnott, por mencionar sólo unos cuantos de los numerosos vitalistas de principios del siglo xx. M. T. Ghiselin — *The Economy of Nature and the Evolution of Sex*, University of California Press, Berkeley, 1974— designa como criptovitalistas a W. Cannon, L. Henderson, W. M. Wheeler y A. N. Whitehead.

¹⁸ T. A. Goudge, *The Ascent of Life: A Philosophical Study of the Theory of the Evolution*, University of Toronto Press, Toronto, 1961; T. Lenoir, *op. cit.* La oposición al seleccionismo de Darwin también fue un elemento frecuente en los argumentos vitalistas (H. Driesch, *op. cit.*).

En parte por sus inclinaciones teleológicas, los vitalistas se oponían vehementemente al seleccionismo de Darwin. La teoría de la evolución de Darwin negaba la existencia de cualquier teleología cósmica, y la remplazaba con un “mecanismo” causante del cambio evolutivo: la selección natural. “Podemos ver en el descubrimiento de Darwin de la selección natural en la lucha por la existencia la prueba más decisiva de la validez exclusiva de la causación mecánica que opera en el reino todo de la biología, y vemos también la desaparición definitiva de todas las interpretaciones teleológicas y vitalistas de los organismos vivientes.”¹⁹ El seleccionismo eliminó la necesidad del vitalismo en el ámbito de la adaptación.

Driesch era un antidarwiniano furibundo, como lo fueron otros vitalistas, y sus argumentos contra la selección natural, invariablemente ridículos, demostraban que él no entendía en absoluto esta teoría. El darwinismo, al proporcionar un mecanismo para la evolución, negando cualquier idea finalista o vitalista sobre la vida, se convirtió en el fundamento de un nuevo paradigma para explicar la “vida”.

LA DECADENCIA DEL VITALISMO

El vitalismo pareció proporcionar una respuesta razonable a la persistente pregunta sobre qué es la vida, cuando se propuso por vez primera y fue ampliamente adoptado. Fue además, en esa época, una alternativa teórica legítima a no sólo el burdo mecanicismo de la Revolución científica, sino también al fisicismo decimonónico. El vitalismo sin duda explicaba las manifestaciones de la vida mucho más convincentemente que la teoría mecanicista de sus oponentes.

Pero si se considera hasta qué punto predominó el vitalismo en la biología y durante cuánto tiempo prevaleció, es sorprendente su rápido y total derrumbe. Hacia 1930 desaparecieron los últimos partidarios del vitalismo como concepto viable. Muchos y diversos factores contribuyeron a su caída.

Primero, cada vez se veía más al vitalismo como un concepto metafísico, en vez de científico. No se consideraba científico porque los vitalistas no poseían un método para ponerlo a prueba. Mediante su insistencia en la existencia de una fuerza vital, los vitalistas con frecuencia obstruyeron la búsqueda de un reduccionismo constitutivo que pudiera elucidar las funciones básicas de los organismos vivientes.

¹⁹ E. Haeckel, *Generelle Morphologie der Organismen. Allgemeine Grundzüge der organischen Formen-Wissenschaft, mechanisch begründet durch die von Charles Darwin reformirte Descendenz-Theorie*, 2 vols., Georg Reimer, Berlín, 1866.

Segundo, la idea de que los organismos se constituían de una sustancia especial muy distinta a la de la materia inanimada, gradualmente perdió respaldo. Durante la mayor parte del siglo XIX se pensó que esa sustancia era el protoplasma, la materia celular en el exterior del núcleo.²⁰ Posteriormente se le llamó citoplasma (término introducido por Kölliker). Ya que el protoplasma parecía tener presuntas propiedades “coloidales”, se produjo un florecimiento de una rama de la química: la química coloidal. No obstante, la bioquímica, junto con el microscopio electrónico, andando el tiempo habría de establecer la verdadera composición del citoplasma, elucidando la naturaleza de sus diversos componentes: organelos celulares, membranas, y macromoléculas. Se estableció que no había tal sustancia, el “protoplasma”, y el término y el concepto desaparecieron de la literatura biológica. Asimismo, la naturaleza del estado coloidal se explicó bioquímicamente, y la química coloidal dejó de existir. Por ende, desapareció toda la evidencia de una categoría peculiar de sustancia viviente, y se hizo posible la explicación de las propiedades únicas de la materia viviente con base en las macromoléculas y su organización. Estas macromoléculas a su vez se componen de los mismos átomos y micromoléculas que existen en la materia inanimada. La síntesis que realizó Wohler en el laboratorio de la sustancia orgánica urea fue la primera prueba de la transformación artificial de los compuestos inorgánicos en moléculas orgánicas.

Tercero, todos los intentos vitalistas de demostrar la existencia de una fuerza vital no material terminaron en el fracaso. Una vez que los procesos fisiológicos y los procesos del desarrollo empezaron a explicarse sobre la base de los procesos físicoquímicos en el nivel celular y molecular, se excluyó la posibilidad de un residuo inexplicable que pudiera interpretarse vitalistamente. El vitalismo simplemente se volvió superfluo.

Cuarto, se desarrollaron nuevos conceptos biológicos para explicar los fenómenos que solían ser citados como pruebas del vitalismo. Dos adelantos en particular fueron cruciales en este cambio. Uno fue el auge de la genética, que finalmente condujo al concepto del programa genético. De esta manera se pudo explicar, al menos en principio, como procesos teleonómicos controlados por

²⁰ Empezando con C. R. Wolff (1734-1794), se desarrolló la idea de que existía una cosa básica e indiferenciada que daba origen a los elementos más formados. E. Dujardin (1801-1860) fue el primero que la describió (“Recherche sur les organismes inférieurs”, *Annales des Sciences Naturelles*, 2, IV: Zoologie, Crochard, París, 1835, pp. 343-377) y definió propiamente con el nombre de “sarcoda”. Con el florecimiento del microscopio, ésta se examinó con creciente interés. J. E. Purkyně acuñó el término de “protoplasma” en 1840. Para T. H. Huxley, en 1869, el protoplasma era el fundamento de la vida. El citoplasma fue el término propuesto por Kölliker para designar la materia celular en torno al núcleo.

programas genéticos, todos los fenómenos vivientes intencionales. Otro fenómeno aparentemente teleológico que se interpretó de un modo nuevo fue el concepto de *Zweckmäßigkeit* de Kant. Esta reinterpretación se logró gracias al segundo avance, el darwinismo. La selección natural viabilizaba la adaptación a partir de la utilización de la abundante variabilidad de la naturaleza viviente. Así, dos puntos ideológicos principales del vitalismo —la teleología y el antiseleccionismo— quedaron anulados. La genética y el darwinismo tuvieron éxito en proporcionar interpretaciones válidas de los fenómenos que según los vitalistas eran inexplicables sin el recurso a una sustancia o fuerza vital.

Si uno aceptara los escritos fisicistas, tendría que creer que el vitalismo no fue más que un impedimento para el desarrollo de la biología. El vitalismo, según los fisicistas, extrajo los fenómenos de la vida del ámbito de la ciencia, llevándolos al de la metafísica. Tal crítica es ciertamente justificada en el caso de los vitalistas más místicos, pero no lo es respecto a científicos auténticos como Blumenbach, y, sobre todo, Müller, quien articuló específicamente todos los aspectos de la vida que los fisicistas no pudieron explicar. El hecho de que la explicación que éste adoptó fuera errónea no disminuye su mérito de haber categorizado los problemas que aún había que resolver.

En la historia de la ciencia hay situaciones similares, donde se adoptaron esquemas explicativos inadecuados para un problema claramente visualizado, ya que las bases para la explicación real todavía no se habían establecido. Ejemplo famoso es la explicación, por Kant propuesta, de la evolución teleológica. Probablemente se justifica concluir que el movimiento del vitalismo tuvo la virtud de demostrar la incapacidad del fisicismo superficial para explicar la vida. Sin duda, como sostiene correctamente François Jacob,²¹ gracias a los vitalistas la biología fue reconocida como una disciplina científica autónoma.

Antes de seguir con el paradigma organicista que sustituyó tanto al vitalismo como al fisicismo, podríamos de paso señalar un fenómeno del siglo xx bastante singular: el desarrollo de ideas vitalistas entre los físicos. Niels Bohr al parecer fue el primero en sugerir que ciertas leyes especiales que no se encontraban en la naturaleza inanimada podrían operar en los organismos. Él pensaba que tales leyes eran análogas a las leyes de la física, excepto que se limitaban a los organismos. Erwin Schrödinger y otros físicos tenían conceptos similares. Francis Crick²² dedicó todo un libro a refutar las ideas vitalistas de los físicos Walter Elsasser y Eugene Wigner. Resulta curioso que una especie de vitalismo sobreviviera en la mente

²¹ F. Jacob, *op. cit.*

²² F. Crick, *Of Molecules and Men*, University of Washington Press, Seattle, 1966.

de algunos prestigiosos científicos después de que hacía mucho tiempo se hubiera extinguido en la mente de los biólogos más acreditados.

Es además irónico que muchos biólogos del periodo post 1925 creían que los recientemente descubiertos principios de la física, tales como la teoría de la relatividad, el principio de complementariedad de Bohr, la mecánica cuántica, y el principio de indeterminación de Heisenberg, podían ofrecer nuevos criterios sobre los procesos biológicos. De hecho, hasta donde yo sé, ninguno de estos principios de la física es aplicable a la biología. A pesar de que Bohr haya buscado en la biología evidencias de la complementariedad, estableciendo algunas desesperadas analogías al respecto, en realidad no existe nada en la biología que se parezca a ese principio. La indeterminación de Heisenberg es algo muy diferente de cualquier tipo de indeterminación que pueda hallarse en la biología.

El vitalismo sobrevivió aún más tiempo en los escritos de los filósofos que en los de los físicos. Pero hasta donde yo pueda saberlo, no se encuentra ningún vitalista en el grupo de filósofos de la biología que empezaron a publicar después de 1965. Y tampoco conozco a un solo biólogo prestigioso aún vivo que todavía apoye el vitalismo propiamente dicho. Los pocos biólogos del siglo xx que tenían tendencias vitalistas (A. Hardy, S. Wright, A. Portmann) ya han muerto.

LOS ORGANICISTAS

Ya hacia 1920 el vitalismo parecía desacreditado. El fisiólogo J. S. Haldane²³ afirmó correctamente que los “biólogos han abandonado casi unánimemente el vitalismo como concepción aceptada”. Al mismo tiempo, él también dijo que una interpretación puramente mecanicista no puede explicar la coordinación que es tan característica de la vida. Lo que más le parecía enigmático en particular a Haldane era la ordenada secuencia de sucesos durante el desarrollo. Tras demostrar la invalidez del vitalismo y de los planteamientos mecanicistas, Haldane afirmó que “tenemos que encontrar un fundamento teórico diferente para la biología, basado en la observación de que todos los fenómenos involucrados tienden a estar tan coordinados como para expresar lo que es normal en un organismo adulto”.

La muerte del vitalismo, en vez de resultar en la victoria del mecanicismo, dio como resultado un nuevo sistema explicativo. Este nuevo paradigma decía que los procesos en el nivel molecular podían explicarse exhaustivamente mediante

²³ J. S. Haldane, *The Philosophical Basis of Biology*, Hodder & Stoughton, Londres, 1931.

mecanismos fisicoquímicos, pero que estos mecanismos tenían una función cada vez menor, si no insignificante, en los niveles superiores de la integración, donde se veían suplementados o remplazados con las características emergentes de los sistemas organizados. Las características únicas de los organismos vivos no se deben a su composición, sino más bien a su organización. Tal forma de pensar hoy se conoce usualmente como *organicismo*. Éste hace énfasis particularmente en las características de los sistemas ordenados de gran complejidad y en la naturaleza histórica de los programas genéticos evolucionados de los organismos.

Según W. E. Ritter, quien acuñó el término *organicismo* en 1919,²⁴ “los conjuntos están relacionados de tal manera con sus partes que la existencia del conjunto no sólo depende de la cooperación ordenada y la interdependencia de sus partes, sino que el conjunto ejerce cierta medida de control determinativo sobre sus partes”.²⁵ J. C. Smuts²⁶ explicó su propio punto de vista holístico sobre los organismos como sigue: “Un conjunto, según el punto de vista que aquí se expone, no es simple, sino compuesto. Los conjuntos naturales, tales como los organismos, son [...] complejos o compuestos, consistiendo en muchas partes que tienen una relación e interacción activas de un tipo u otro, y las partes pueden ser en sí mismas conjuntos menores, tales como las células de un organismo”. Otros biólogos condensaron sus aseveraciones en la afirmación concisa de que “un conjunto es más que la suma de sus partes”.²⁷

²⁴ En realidad, la utilización de este término en las ciencias sociales se remonta a Comte, aunque *organicismo* significaba una cosa bastante diferente para los sociólogos que para los biólogos. L. von Bertalanffy —*Problems of Life: An Evaluation of Modern Biological and Scientific Thought*, Harper, Nueva York, 1952, p. 182— menciona unos 30 autores que habían declarado su apoyo a un planteamiento holístico. La lista, sin embargo, es incompleta; no incluye siquiera el nombre de C. L. Morgan, J. C. Smuts y J. S. Haldane. El concepto del *intègron* de F. Jacob (*op. cit.*) resulta ser un respaldo particularmente bien argumentado del pensamiento organicista.

²⁵ W. E. Ritter y E. W. Bailey, “The Organismal Conception: Its Place in Science and its Bearing on Philosophy”, *University of California Publications in Zoology*, 31 (14): 307-358, 1928.

²⁶ J. C. Smuts, *Holism and Evolution*, Macmillan and Co., Nueva York, 1926.

²⁷ J. H. Woodger —*Biological Principles. A Critical Study*, Kegan Paul, Trench, Trübner & Co., Londres, 1929— da una lista impresionante de los biólogos que apoyaron el punto de vista organicista; E. B. Wilson —*The Cell in Development and Inheritance*, 3ª ed., Macmillan, Nueva York, 1925, p. 56—, por ejemplo, dijo que “hasta el más superficial conocimiento de las actividades celulares nos muestra que [explicar la célula como una máquina química] no puede aceptarse en ningún sentido mecánico burdo; la diferencia entre la célula e incluso la más intrincada máquina artificial sigue siendo demasiado grande como para poder abarcarse por nuestros conocimientos actuales [...] la investigación moderna ha aportado el creciente reconocimiento del hecho de que la célula es un sistema orgánico, y uno en que debemos reconocer la existencia de algún tipo de estructura ordenada u organización”. No sorprende que el pensamiento holístico siempre estuvo particularmente bien representado entre los biólogos del desarrollo. Se mostró pujante en los escritos de C. O. Whitman, E. B. Wilson y F. R. Lillie. D. J. Haraway —*Crystals, Fabrics, and Fields: Metaphors of Organicism in Twentieth-Century Developmental Biology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1976— dedica la mayor parte de todo un libro al *organicismo*

Desde el decenio de 1920, los términos holismo y organicismo se han utilizado de manera intercambiable. Inicialmente se utilizó el sustantivo holismo con más frecuencia; el adjetivo “holístico” todavía es útil hoy. Pero no es el holismo un término estrictamente biológico, puesto que muchos sistemas inanimados son también holísticos, como Niels Bohr lo señaló con razón. Por ende, hoy se utiliza con más frecuencia en la biología el término más restringido de “organicismo”. Éste incorpora la aceptación de que la existencia del programa genético es un aspecto importante del nuevo paradigma.

Los organicistas objetaron no tanto los aspectos mecanicistas del fisicismo como su reduccionismo. Los fisicistas decían que sus planteamientos eran explicaciones mecanicistas, lo cual era verdad, pero los caracterizaba mucho más todavía su reduccionismo. Para los reduccionistas, el problema de la explicación se resuelve en principio cuando se logra la reducción a los componentes más pequeños. Ellos alegan que cuando uno ha logrado completar el inventario de estos componentes y ha determinado la función de cada cual, la tarea de explicar también todo lo que se observa en los niveles superiores de organización se facilita.

Los organicistas demostraron que esta afirmación simplemente no es cierta, porque el reduccionismo explicativo no es capaz de explicar las características de los organismos que emergen en los niveles organizativos superiores. Es curioso que incluso la mayoría de los mecanicistas admitieran la insuficiencia de una explicación puramente reduccionista. El filósofo Ernest Nagel²⁸ concedía que “hay amplios sectores de la investigación biológica en que las explicaciones químicas en la actualidad no juegan un papel, y se han utilizado con éxito diversas teorías de la biología muy excepcionales que no tienen un carácter fisicoquímico”. Nagel trató de rescatar el reduccionismo mediante la inserción de las palabras “en la actualidad”, pero ya era bastante obvio que conceptos tan exclusivamente biológicos como los del territorio, el alarde, la defensa contra los predadores, y demás, no se podían reducir jamás a los términos de la química y la física sin perder su sentido biológico.²⁹

de tres embriólogos: Ross Harrison, Joseph Needham y Paul Weiss. Es interesante que Harrison veía la emergencia como un principio metafísico y, por ende, consideraba a Lloyd Morgan un vitalista. Como muchos de los biólogos en el periodo posterior a 1925, él pensaba que los recientes descubrimientos de la física, tales como la teoría de la relatividad, el principio de complementariedad de Bohr, la mecánica cuántica y el principio de indeterminación de Heisenberg, eran aplicables tanto a la biología como a la física.

²⁸ E. Nagel, *The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation*, Harcourt, Brace & World, Nueva York, 1961.

²⁹ E. Nagel (*op. cit.*) definió al mecanicista en biología como “uno que cree que todos los fenómenos

Los pioneros del holismo, por ejemplo E. S. Russel y J. S. Haldane, cuestionaron eficazmente el planteamiento reduccionista y describieron convincentemente la forma en que un planteamiento holístico es adecuado para los fenómenos del comportamiento y el desarrollo. Pero fracasaron en explicar la naturaleza real de los fenómenos holísticos. No tuvieron éxito cuando intentaron explicar la naturaleza del “conjunto” o la integración de las partes en el conjunto. Ritter, Smuts y otros partidarios iniciales del holismo mostraron ser igualmente imprecisos (y algo metafísicos) en sus planteamientos. De hecho, algunas de las expresiones de Smuts tienen un matiz bastante teleológico.³⁰

Alex Novikoff,³¹ sin embargo, resumió detalladamente la cuestión de por qué tiene que ser holística una explicación de los organismos vivos. “Los conjuntos en un nivel se convierten en partes en el nivel superior [...] tanto las partes como los conjuntos son entes materiales, y la integración es el resultado de la interacción de las partes como consecuencia de sus propiedades.” El holismo, puesto que rechaza la reducción, “no ve los organismos vivos como máquinas hechas con una cantidad de partes diferentes (unidades fisicoquímicas), que son desmontables como los pistones de un motor y que se pueden describir sin relación al sistema del cual se desmontan”. Por causa de la interacción de las partes, la descripción de las partes por separado no es capaz de dar a entender las propiedades del sistema en conjunto. Es la organización de estas partes la que controla el sistema entero.

La integración de las partes se da en cada nivel, desde la célula a los tejidos, órganos, sistemas orgánicos y organismos enteros. Esta integración se puede encontrar en el nivel bioquímico, en el nivel del desarrollo, y, en el caso de los organismos enteros, en el nivel del comportamiento.³² Todos los holistas están de acuerdo en que ningún sistema puede explicarse exhaustivamente mediante las propiedades de sus componentes aislados. El fundamento del organicismo es el hecho de que los seres vivos poseen una organización. No son simplemente

vivos pueden explicarse inequívocamente en términos fisicoquímicos, es decir, con los términos de las teorías que han sido originalmente desarrolladas para los campos de investigación donde la distinción entre lo vivo y lo no vivo no desempeña un papel, términos que por común acuerdo se reservan a la física y la química”. Este tipo de reducción caracteriza todo el planteamiento de Nagel.

³⁰ Por ejemplo: “El holismo es una tendencia específica que posee un carácter definido y que crea todos los caracteres del universo, y que por lo tanto es fructífera en sus resultados y explicaciones respecto al curso entero del desarrollo cósmico” (J. C. Smuts, *op. cit.*, p. 100). No sorprende que el holismo, tal como lo presenta Smuts, se considerara por muchos como un concepto metafísico.

³¹ A. B. Novikoff, “The Concept of Integrative Levels and Biology”, *Science*, 101 (2618): 209-215, 1945.

³² El tema de los niveles de integración se expone minuciosamente en la publicación de un simposio: R. Redfield (coord.), *Biological Symposia*, vol. VIII: *Levels of Integration in Biological and Social Systems*, The Jacques Cattell Press, Lancaster, 1942, pp. 163-176.

montones de caracteres o de moléculas, porque su función depende totalmente de su organización, sus interrelaciones mutuas, sus interacciones y sus interdependencias.

LA EMERGENCIA

Hoy es claro que en todos los planteamientos iniciales del holismo faltaban dos pilares principales de la estructura explicativa de la biología moderna. Uno, el concepto del programa genético no estaba allí porque aún no se había desarrollado. El otro pilar faltante era el concepto de la emergencia: el hecho de que en un sistema estructurado emergen nuevas propiedades en los niveles superiores de integración, propiedades que no se podían presuponer a partir del conocimiento de los componentes de los niveles inferiores. Este concepto faltaba, ya sea porque no se había pensado en él, ya sea porque se había descartado como poco científico y metafísico. Mediante la incorporación de los conceptos del programa genético y de la emergencia, el organicismo se volvió antirreduccionista, pero siguió siendo mecanicista.

F. Jacob³³ describe así la emergencia: “En cada nivel se asocian unidades de una magnitud relativamente bien definida y de una estructura casi idéntica, a fin de formar una unidad en el nivel inmediatamente superior. A todas estas unidades formadas mediante la integración de subunidades se les puede dar el nombre general de ‘integrone’. Un integrón se forma mediante el ensamble de los integrone del nivel inmediatamente inferior; participa en la construcción del integrón en el nivel inmediatamente superior”. Cada integrón posee nuevas características y capacidades que no se hallan en cualquier nivel de integración inferior; se puede decir que estas características emergen.³⁴

El concepto de la emergencia apareció de manera prominente en el libro de Lloyd Morgan sobre la evolución emergente.³⁵ Los darwinistas que aceptaron la evolución emergente, sin embargo, tenían ciertas dudas al respecto, pues temían

³³ F. Jacob, *op. cit.*

³⁴ Un error que se cometió con particular frecuencia fue considerar que cada nivel de la integración es un fenómeno global. No es tal cosa lo que estos niveles son. Todos los integrone, desde el nivel molecular hasta el nivel del supraorganismo, son singulares. Esta interpretación no contradice la afirmación de A. Novikoff (*op. cit.*): “Las leyes que describen las propiedades singulares de cada nivel son cualitativamente distintas y su descubrimiento requiere métodos de investigación y análisis apropiados para el nivel particular”; y, añadiríamos hoy, apropiados para el integrón particular. Un evolucionista moderno diría que la formación de un sistema más complejo, el cual representa un nuevo nivel superior, es estrictamente un asunto de la variación y selección genética. Tampoco contradice los principios del darwinismo.

³⁵ C. L. Morgan, *Emergent Evolution*, 2ª ed., Williams and Norgate, Londres, 1927.

que fuera antigradual. Efectivamente, algunos de los primeros emergencionistas también fueron saltacionistas, particularmente durante el periodo del mendelismo; es decir, que creían que la evolución avanzaba a grandes saltos discontinuos. Estas dudas ya se han superado, porque hoy se entiende que la población (o especie), más que el gen o el individuo, es la unidad de la evolución; pueden existir diferentes formas (discontinuidades fenotípicas) dentro de las poblaciones —gracias a la recombinación del ADN existente— pero una población en su conjunto tiene que evolucionar necesariamente en forma gradual. Un evolucionista moderno diría que la formación de un sistema más complejo, el cual representa la emergencia en un nuevo nivel superior, es estrictamente cuestión de la variación y selección genética. Los integrones evolucionan mediante la selección natural, y en cada nivel integran sistemas adaptados porque contribuyen a la estabilidad física del individuo. Esto de ninguna manera contradice los principios del darwinismo.

En resumen, el organicismo se puede caracterizar óptimamente mediante la doble certeza, primero, de la importancia de considerar el organismo como un todo, y, al mismo tiempo, la firme convicción de que esta integridad no debe considerarse como algo misteriosamente cerrado al análisis, sino como algo que se debe estudiar y analizar eligiendo el nivel correcto de análisis. El organicista no rechaza el análisis, pero insiste en que el análisis sólo se puede llevar hasta el nivel inferior donde el examen pueda cosechar nuevos datos y percepciones importantes. Cada sistema, cada integrón, pierde algunas de sus características cuando se desmonta, y muchas de las interacciones importantes de los componentes de un organismo no ocurren en el nivel fisicoquímico, sino en el nivel superior de la integración. Y, finalmente, es el programa genético el que controla el desarrollo y las actividades de los integrones orgánicos que emergen sucesivamente en cada nivel superior de integración.

LAS CARACTERÍSTICAS DISTINTIVAS DE LA VIDA

Hoy, si se consulta el tema, ya sea con los biólogos o con los filósofos de la ciencia activos, parece haber un consenso sobre la naturaleza de los organismos vivientes. En el nivel molecular, todas —y en el celular, casi todas— sus funciones obedecen a las leyes de la física y la química. No hay un residuo que pudiera requerir principios vitalistas autónomos. Aun así, los organismos son fundamentalmente diferentes de la materia inerte. Son sistemas ordenados jerárquicamente que po-

seen muchas propiedades emergentes que jamás se encuentran en la materia inanimada; y, sobre todo, sus actividades se gobiernan por programas genéticos que contienen información históricamente adquirida, cosa que tampoco se encuentra en la naturaleza inanimada.

Como resultado, los organismos vivos representan una forma extraordinaria del dualismo. No es éste el dualismo del cuerpo y el alma, o del cuerpo y la mente, es decir, un dualismo parcialmente físico y parcialmente metafísico. El dualismo de la biología moderna es consistente con la fisicoquímica y se debe a que los organismos poseen tanto un genotipo como un fenotipo. El genotipo, que consiste en ácidos nucleicos, requiere para su comprensión explicaciones evolutivas. El fenotipo, construido con base en la información provista por el genotipo, consiste en proteínas, lípidos y otras macromoléculas y requiere explicaciones funcionales (aproximadas) para su comprensión. Este tipo de dualidad no se conoce en el mundo inanimado. La explicación del genotipo y la del fenotipo requieren un tipo distinto de teoría.

Mencionemos algunos de los fenómenos que son específicos en los seres vivos.

Programas evolutivos

Los organismos son el producto de 3 800 millones de años de evolución. Todas sus características reflejan esta historia. El desarrollo, el comportamiento y todas las demás actividades de los organismos vivos en parte se controlan por programas genéticos (y somáticos) que son el resultado de la información genética acumulada a través de la historia de la vida. Históricamente, ha habido un flujo inintermitente desde el origen de la vida y los procariontes más elementales, hasta los árboles gigantes, los elefantes, las ballenas, y los humanos.

Propiedades químicas

Aunque en definitiva los organismos vivos consisten en los mismos átomos que la materia inanimada, el tipo de moléculas responsables del desarrollo y la funcionalidad de los organismos vivos —ácidos nucleicos, péptidos, enzimas, hormonas, componentes de membranas— son macromoléculas que no existen en la materia inanimada. La química orgánica y la bioquímica han demostrado que todas las sustancias que existen en los organismos vivos pueden disgre-

garse en moléculas inorgánicas más elementales y pueden sintetizarse, al menos en principio, en el laboratorio.

Mecanismos reguladores

Los sistemas vivientes se caracterizan por todo tipo de mecanismos de control y regulación, los cuales mantienen el estado estable del sistema, mecanismos de un tipo que no es posible encontrar jamás en la naturaleza inanimada.

Organización

Los organismos vivientes son sistemas complejos, ordenados. Esto explica su capacidad para regular y controlar la interacción del genotipo, así como su capacidad para delimitar el desarrollo y la evolución.

Sistemas teleonómicos

Los organismos vivientes son sistemas adaptados, producto de generaciones incontables que han experimentado la selección natural. Estos sistemas se programan para actividades teleonómicas (dirigidas a un objetivo), desde el desarrollo embriológico hasta las actividades fisiológicas y conductuales de los adultos.

Grado de magnitud limitado

El tamaño de los organismos vivientes en el mundo natural tiene una gradación limitada en el “mundo medio”, aunque abarque desde los virus más pequeños hasta las ballenas y los árboles más grandes. Las unidades básicas de la organización biológica, las células y los componentes celulares, son muy pequeños, lo cual les da a los organismos una gran flexibilidad en el desarrollo y la evolución.

Ciclo de vida

Los organismos, al menos aquellos que se reproducen sexualmente, atraviesan un determinado ciclo de vida que empieza con un cigoto (óvulo fertilizado) y pasa por varias etapas embrionarias o larvales, hasta alcanzar la madurez. Las complejidades del ciclo vital varían de especie en especie, existiendo en algunas especies una alternancia de generaciones sexuales y asexuales.

Sistemas abiertos

Los organismos vivos obtienen energía y sustancias del medio ambiente externo y desechan los productos finales del metabolismo. Siendo sistemas abiertos, no están sujetos a las limitaciones de la segunda ley de la termodinámica.

Las anteriores propiedades de los organismos vivos les otorgan diversas capacidades que no poseen los sistemas inanimados:

La capacidad para la evolución.

La capacidad para la autorreproducción.

La capacidad para el crecimiento y la diferenciación mediante un programa genético.

La capacidad para el metabolismo (captación y liberación de energía).

La capacidad (a través de la percepción y de los órganos sensoriales) para responder a los estímulos del medio ambiente.

La capacidad para el cambio en dos niveles, el del fenotipo y el del genotipo.

Todas estas características de los organismos vivos los distinguen categóricamente de los sistemas inanimados. La gradual aceptación de la singularidad y separabilidad del mundo vivo ha dado por resultado la rama de la ciencia llamada biología y ha llevado a admitir la autonomía de esta ciencia.

BIBLIOGRAFÍA

Bertalanffy, L. von, *Problems of Life: An Evaluation of Modern Biological and Scientific Thought*, Harper, Nueva York, 1952. [Versión en español: *Concepción biológica del cosmos*, trad. de Faustino Córdón, Universidad de Chile, Santiago, 1963.]

- Blandino, G., *Theories on the Nature of Life*, Philosophical Library, Nueva York, 1969.
- Cassirer, E., *The Problem of Knowledge: Philosophy, Science, and History after Hegel*, Yale University Press, New Haven, 1950. [Versión en español: *El problema del conocimiento en la filosofía y en la ciencia moderna*, iv: *De la muerte de Hegel a nuestros días (1832 -1932)*, Fondo de Cultura Económica, México, 1948.]
- Crick, F., *Of Molecules and Men*, University of Washington Press, Seattle, 1966.
- Dijksterhuis, E. J., *The Mechanization of the World Picture*, trad. de C. Dikshoorn, Oxford University Press, Nueva York, 1961. [Título original: *De mechanisering van het wereldbeeld*.]
- Driesch, H., *Der Vitalismus als Geschichte und als Lehre*, J. A. Barth, Leipzig, 1905.
- Du Bois-Reymond, E., *Über die Grenzen des Naturerkenntens*, Veit & Co., Leipzig, 1872.
- , “Gedächtnissrede auf Johannes Müller”, en *Abhandlungen der Königlichen Akademie der Wissenschaften zu Berlin 1859*, pp. 25-191.
- Dujardin, E., “Recherche sur les organismes inférieurs”, en *Annales des Sciences Naturelles*, 2, iv: *Zoologie*, Crochard, París, 1835, pp. 343-377.
- Galilei, G., “The Assayer”, en Galileo Galilei et al., *The Controversy on the Comets of 1618*, trad. de Stillman Drake y C. D. O'Malley, University of Pennsylvania Press, Filadelfia, 1960. [Versión en español: *El ensayador*, trad. del italiano, pról. y notas de José Manuel Revuelta, Aguilar, Buenos Aires, 1981.]
- Ghiselin, M. T., *The Economy of Nature and the Evolution of Sex*, University of California Press, Berkeley, 1974.
- Goudge, T. A., *The Ascent of Life: A Philosophical Study of the Theory of the Evolution*, University of Toronto Press, Toronto, 1961.
- Haeckel, E., *Generelle Morphologie der Organismen. Allgemeine Grundzüge der organischen Formen-Wissenschaft, mechanisch begründet durch die von Charles Darwin reformirte Descendenz-Theorie*, 2 vols., Georg Reimer, Berlín, 1866.
- Haldane, J. S., *The Philosophical Basis of Biology*, Hodder & Stoughton, Londres, 1931.
- Hall, T. S., *Ideas of Life and Matter: From the Enlightenment to the End of the Nineteenth Century*, 2 vols., The University of Chicago Press, Chicago, 1969.
- Haraway, D. J., *Crystals, Fabrics, and Fields: Metaphors of Organicism in Twentieth-Century Developmental Biology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1976.
- Jacob, F., *The Logic of Life: A History of Heredity*, Pantheon, Nueva York, 1973. [Versión original en francés: *La logique du vivant. Une histoire de l'hérédité*, Gallimard, París, 1976; versión en español: *La lógica de lo viviente*, Tusquets, Barcelona, 1999.]
- Kölliker, R. von, *Das Karyoplasma und die Vererbung: eine Kritik der Weismann'schen Theorie von der Kontinuität des Keimplasma*, Leipzig, 1886.
- La Mettrie, J. O. de, *L'homme machine*, Elie Luzac, Leiden, 1748. [Versión en español: *El*

- hombre máquina. El arte de gozar*, trad. de Agustín Izquierdo y María Badiola, Valde-mar, Madrid, 2000.]
- Lenoir, T., *The Strategy of Life: Teleology and Mechanics in Nineteenth-Century German Biology*, D. Reidel, Dordrecht, 1982.
- Maier, A., *Die Mechanisierung des Weltbildes im 17. Jahrhundert*, Meiner, Leipzig, 1938.
- McLaughlin, P., "Newtonian Biology and Kant's Mechanistic Concept of Causality", en G. Funke (comp.), *Akten des 7. Internationalen Kant-Kongresses*, vol. II, Bouvier Verlag, Bonn, 1991, pp. 57-66.
- Morgan, C. L., *Emergent Evolution*, 2ª ed., Williams and Norgate, Londres, 1927.
- Nagel, E., *The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation*, Harcourt, Brace & World, Nueva York, 1961. [Versión en español: *La estructura de la ciencia*, Paidós, Barcelona, 2006.]
- Nägeli, C. von, *Mechanisch-physiologische Theorie der Abstammungslehre*, R. Oldenbourg, München-Leipzig, 1884.
- , "Über die gegenwärtige Aufgabe der Naturgeschichte, insbesondere der Botanik", *Zeitschrift für Wissenschaftliche Botanik*, 1-2: 1.
- Novikoff, A. B., "The Concept of Integrative Levels and Biology", *Science*, 101 (2618): 209-215, 1945.
- Redfield, R. (coord.), *Biological Symposia*, vol. VIII: *Levels of Integration in Biological and Social Systems*, The Jacques Cattell Press, Lancaster, 1942.
- Rensch, B., *Biophilosophy*, Springer, Berlín, 1986.
- Ritter, W. E., y E. W. Bailey, "The Organismal Conception: Its Place in Science and its Bearing on Philosophy", *University of California Publications in Zoology*, 31 (14): 307-358, 1928.
- Rosenfield, L. C., *From Beast-Machine to Man-Machine: Animal Soul in French Letters from Descartes to La Mettrie*, Oxford University Press, Nueva York, 1941.
- Roux, W., *Gesammelte Abhandlungen über Entwicklungsmechanik der Organismen*, 2 vols., Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1895.
- , "Das Wesen des Lebens", en Paul Hinneberg (ed.), *Kultur der Gegenwart. Ihre Entwicklung und ihre Ziele*, serie III: *Die mathematischen, naturwissenschaftlichen und medizinischen Kulturgebiete*, tomo 4: *Organische Wissenschaften*, vol. 1: *Allgemeine Biologie*, B. G. Teubner Verlag, Leipzig, 1913, pp. 173-187.
- Smuts, J. C., *Holism and Evolution*, Macmillan and Co., Nueva York, 1926.
- Wilson, E. B., *The Cell in Development and Inheritance*, 3ª ed., Macmillan, Nueva York, 1925.
- Woodger, J. H., *Biological Principles. A Critical Study*, Kegan Paul, Trench, Trübner & Co., Londres, 1929.

Tibor Gánti

VII. LOS PRINCIPIOS DE LA VIDA*
(Fragmentos)

LOS CRITERIOS DE LA VIDA

Los sistemas vivos y los no vivos son cualitativamente diferentes, es decir, los sistemas vivos poseen propiedades cualitativas o grupos de propiedades cualitativas que se producen exclusivamente en el mundo vivo y que no es posible encontrar en el mundo no vivo. En el siguiente texto, a estas características comunes de los organismos vivos se les llamará criterios de vida; las leyes que unifican estas características se considerarán como el “principio de la vida”; y la vida misma, en cuanto abstracción general común a todo tipo de ser vivo, se aceptará como una categoría filosófica y no como una categoría biológica. En este capítulo se expondrán los criterios de la vida, y el principio de la vida se argumentará en relación con la organización del chemoton. En el presente libro no se discutirá la cuestión de la vida como categoría filosófica.

La selección y la formulación axiomáticamente exacta de los criterios de vida tienen una importancia fundamental en la biología teórica. Como sabemos, la biología clásica no ha sido capaz de resolver este problema en los 2000 años de su larga historia. Aquí hemos de presentar un nuevo sistema de criterios de vida, los cuales son totalmente diferentes de los clásicos “fenómenos de vida”. Se propuso originalmente este nuevo sistema de criterios de vida en la primera edición de 1971 de este libro.¹ Sin embargo, en el diverso mundo de la biología no es fácil seleccionar características fundamentalmente comunes, ya que sería imposible dar con un investigador que pretendiera conocer todos los entes del mundo vivo con la requerida precisión. Por ende, el sistema original de criterios se ha modificado hasta cierto punto desde 1971, y aquí presentamos una versión refinada y actuali-

* Este capítulo apareció originalmente como la sección 3.5 y el capítulo 1 de la obra de T. Gánti, *The Principles of Life*, notas y comentarios de J. Griesemer y E. Szathmáry, Oxford University Press, Nueva York, 2003, pp. 1-10 y 74-80. © Oxford University Press, 2003.

¹ T. Gánti, *Az élet princípiuma*, Gondolat, Budapest, 1971. [Comps.]

zada que afecta tanto al contenido como a la formulación. Sin embargo, esta formulación tampoco puede considerarse como la versión final, ya sea respecto a su contenido o respecto a su exactitud axiomática, aunque no es probable que se requieran cambios importantes en el futuro.

La vida es una función de sistemas materiales que se organizan de una manera particular. Así, la vida no es la propiedad de un tipo especial de materia, en el sentido de la química, es decir, de un compuesto químico (por ejemplo, la proteína o el ácido nucleico), sino que es la propiedad de sistemas específicamente organizados. Por lo tanto, es incorrecto hablar de materia viviente; resulta más apropiado hablar de sistemas materiales vivientes.

Un sistema es un sistema viviente si, y sólo si, ciertos procesos característicamente compuestos (procesos de vida) ocurren en él. El conjunto de tales procesos, es decir, el funcionamiento del sistema, produce fenómenos característicos que son adecuados para diferenciar lo viviente de lo no viviente.

Un sistema adecuado para tales procesos puede estar en funcionamiento o puede estar en un estado de no funcionamiento que es capaz de funcionar. Se dice que este sistema es un sistema viviente cuando se encuentra en estado de funcionamiento; cuando se encuentra en estado de no funcionamiento, pero de funcionalidad potencial, el sistema tiene la capacidad para vivir pero no está muerto. Este estado se corresponde con la vida latente, la muerte clínica, las semillas sin sembrar, los microorganismos deshidratados y los organismos congelados. Es éste un estado que no está dotado de vida, pero que no está muerto.

La muerte es un cambio irreversible que hace que el sistema sea irreversiblemente incapaz de funcionar. En consecuencia, si la vida se corresponde con el estado de funcionamiento de tales sistemas especiales, la muerte se corresponde con el estado que es incapaz de funcionar. Sin embargo, también existe un estado intermedio que es capaz de funcionar pero que no está funcionando realmente, es decir, un estado que tiene la capacidad para vivir, pero en el cual el sistema no está vivo porque los procesos especiales no están ocurriendo, aunque tampoco está muerto porque los procesos pueden iniciarse si las circunstancias adecuadas surgen.

La totalidad de los procesos vivientes, es decir, el funcionamiento de los sistemas vivientes, produce fenómenos especiales que son apropiados para la caracterización general del estado viviente. Algunos de estos fenómenos se presentan en todo ser viviente, sin excepción, en cada momento de su vida. Sin la constante presencia de todos estos fenómenos, el sistema no puede ser un sistema viviente. La presencia de todos estos fenómenos es un criterio imprescindible del estado

viviente; por lo tanto se les llamará criterios de vida verdaderos (efectivos, absolutos). No obstante, existe otro grupo de fenómenos de vida cuya presencia no constituye un criterio necesario para el estado viviente de los organismos individuales, pero que son indispensables para la supervivencia del mundo viviente. A éstos también se les considerará como criterios de vida, y les llamaremos criterios de vida potenciales.

CRITERIOS DE VIDA REALES (ABSOLUTOS)

Un sistema viviente deber ser inherentemente una unidad individual

Se considera que un sistema es una unidad (un “entero”) si sus propiedades no pueden componerse aditivamente con las propiedades de sus partes, y si esta unidad no puede subdividirse en partes que posean las propiedades del sistema entero.

Un sistema que forma una unidad (sistema unitario) no es la simple unión de sus elementos, sino una nueva entidad que posee propiedades cualitativas nuevas, en comparación con las propiedades de sus partes. Estas nuevas propiedades se determinan por las interacciones que ocurren de acuerdo con la organización de los elementos del sistema. Sólo el sistema en su conjunto muestra la totalidad de tales propiedades.

Los sistemas vivientes se forman inherentemente, es decir, por su misma existencia como unidades. Por ende, los sistemas vivientes son inherentemente sistemas unitarios —la vida es siempre la propiedad de un sistema unitario—. Sin embargo, la unidad inherente de los sistemas vivientes no excluye la posibilidad de componentes accesorios, es decir, un sistema unitario no tiene que ser al mismo tiempo un sistema mínimo. Ya que la estructura, tanto como la funcionalidad de los sistemas vivientes, están determinadas genéticamente; la unidad biológica del sistema también se determina genéticamente. El programa genético también proporciona información relacionada con la unidad viviente.

Un sistema viviente tiene que llevar a cabo metabolismo

Por metabolismo entendemos el ingreso activo o pasivo de sustancias y energía en el sistema que las transforma mediante procesos químicos en sus propios constituyentes internos. En el metabolismo también se producen detritos, de ma-

nera que las reacciones químicas dan como resultado un aumento regulado y controlado de los constituyentes internos, así como el suministro de energía al sistema. Los detritos terminan por salir del sistema, ya sea activa o pasivamente. Las expresiones tales como “externo” e “interno” aquí no se refieren a una especie de separación espacial, sino que aluden a la cuestión de si las sustancias forman o no parte orgánica de la organización interna del sistema viviente en cuanto sistema unitario. Así, los nutrientes almacenados como glucógeno o almidón se consideran sustancias externas, incluso si se encuentran ubicados espacialmente en el interior del sistema viviente.

Un sistema viviente tiene que ser inherentemente estable

La estabilidad inherente no es idéntica al equilibrio y tampoco al estado estacionario. Es un estado organizativo especial de los procesos internos del sistema, que hace posible el funcionamiento continuo del sistema y permanece constante a pesar de los cambios en el medio ambiente externo. Esto significa que el sistema en conjunto, aunque reaccione continuamente mediante cambios dinámicos que ocurren dentro del sistema viviente, siempre permanece igual. Además, significa que a pesar de las transformaciones químicas que ocurren permanentemente en el sistema viviente, el sistema mismo no se descompone; más bien, crece, si lo requiere.

La estabilidad inherente es algo más que la homeostasis, puesto que ésta proviene de aquélla. La estabilidad inherente es una propiedad organizativa —una consecuencia natural (como veremos después) de la red de procesos químicos y físicos que tienen lugar en el sistema viviente—. La semilla sin sembrar, el cultivo de tejido congelado, el microorganismo liofilizado y el protozoo deshidratado no se encuentran en homeostasis o en un estado estacionario —aunque todos satisfagan el criterio de la estabilidad inherente— ya que pueden volver a la vida en las circunstancias apropiadas.

Así, un sistema que se encuentra en estado de estabilidad inherente sólo muestra propiedades homeostáticas cuando está funcionando; por lo tanto este criterio incluye el de la homeostasis. Así, un sistema viviente con estabilidad inherente es capaz de vivir, pero no muestra homeostasis si se encuentra en un estado no viviente. Puede en las circunstancias apropiadas pasar de un estado no viviente a un estado viviente, y es entonces cuando adquiere la propiedad de la homeostasis.

El concepto de la homeostasis lo propuso Cannon, el gran fisiólogo estadounidense. Los organismos vivientes tienen un “medio ambiente interno”, distinto en su estado y su composición al del medio ambiente externo. Los sistemas vivientes, ya sean simples células o complejos organismos multicelulares, se esfuerzan en mantener constante este medio ambiente interno, a pesar de los cambios externos. Cannon llamó homeostasis a la persistencia del medio ambiente interno. Como ya se ha visto, esta persistencia del medio ambiente interno es también una propiedad de los sistemas que crecen y se multiplican. Por lo tanto, la homeostasis no es equivalente al equilibrio, al estado estacionario, al “homeostato cibernético” de Ashby, o a la estabilidad de Liapunov.

La persistencia del medio ambiente interno de un organismo, es decir, la homeostasis, sólo puede mantenerse mediante la detección de los cambios en el medio ambiente externo y la consecuente reacción ante ellos con respuestas compensadoras activas. Así, el mecanismo de la homeostasis es la excitabilidad. Esto también puede ocurrir en los sistemas blandos moleculares, como se verá en relación con la teoría del chemoton.

Por lo tanto, la estabilidad inherente, como criterio de vida, incluye en sí misma los criterios de la homeostasis y la excitabilidad, en el sentido más general, por lo que no es necesario listarlos separadamente.

*Un sistema viviente debe tener un subsistema que proporcione
información útil para el sistema entero*

Todas las cosas llevan dentro de sí la información requerida para su origen, desarrollo y función. Sin embargo, hay algunos sistemas que almacenan información respecto a cosas y sucesos que son independientes de ellos. Ejemplos de tales sistemas son los libros, las cintas magnéticas, las fichas perforadas y los discos.

En la naturaleza, la capacidad para almacenar este tipo de “información excedente” sólo puede encontrarse en ciertos subsistemas de sistemas vivientes, tales como la sustancia genética, el cerebro, el sistema inmunitario, etc. Éstos no sólo almacenan información sobre sí mismos, sino también información sobre el sistema entero o hasta del mundo al exterior del sistema. La presencia de subsistemas portadores de información es característica de todo sistema viviente sin excepción, y es un criterio indispensable para el desarrollo del mundo viviente.

La información codificada en un sistema se convierte en información real

sólo cuando existe otro sistema capaz de leer y utilizar esta información codificada. Los sistemas vivos pueden leer y utilizar la información almacenada en sus subsistemas portadores de información; más aún, pueden copiar, es decir, replicar, la información durante su multiplicación. Los seres vivos se caracterizan no sólo por su habilidad para almacenar información, sino también por su habilidad para desempeñar operaciones informativas.

*Los procesos en los sistemas vivos
tienen que regularse y controlarse*

Una condición existencial de todo sistema dinámico, es decir, continuamente operativo, es la regulación de sus procesos. Los sistemas vivos, como sistemas dinámicos blandos, también poseen esta propiedad. La regulación en los sistemas vivos se da primordialmente mediante mecanismos químicos. De hecho, se podría afirmar que la regulación no debería ser un criterio por separado, puesto que ni el metabolismo ni la homeostasis pueden realizarse sin la regulación de los procesos del sistema, y por lo tanto ya se implica en estos criterios.

No obstante, la regulación misma sólo puede asegurar el mantenimiento y el funcionamiento del sistema. Los procesos unidireccionales irreversibles, tales como el crecimiento, la multiplicación, la diferenciación y la evolución, también ocurren en el mundo vivo y no pueden lograrse mediante la regulación solamente. También tienen que ser conducidos, es decir, controlados mediante algún programa. El control en los sistemas vivos también se realiza mediante mecanismos moleculares.

CRITERIOS DE VIDA POTENCIALES

Un sistema vivo tiene que ser capaz de crecer y multiplicarse

El crecimiento y la multiplicación se encuentran entre los criterios de vida clásicos; su presencia es general e indispensable en el mundo vivo. Sin embargo, no son criterios del estado vivo mismo: algunas plantas domesticadas y algunos animales domesticados no son capaces de reproducirse *ab ovo*; los animales castrados no pueden reproducirse; los animales viejos, sin perder la vida, pierden su capacidad para crecer y reproducirse. La presencia del crecimiento y de la reproducción no es un criterio de vida individual, pero sí es una condición para la

existencia del mundo viviente y por lo tanto hay que incluirla entre los criterios de vida potenciales.

Es necesario explicar por qué el crecimiento y la reproducción se combinan en un solo criterio. Los criterios de vida deben ser válidos para todo individuo del mundo viviente en cualquiera de los niveles de la jerarquía organizativa. No obstante, el crecimiento y la multiplicación se separaron sólo en cierto nivel de la evolución; en las procariotas y en muchas eucariotas el crecimiento forma parte de la reproducción. Esto se demostró claramente en los experimentos de Hartmann: durante un periodo de 130 días, él le quitaba diariamente, sin tocar el núcleo, una tercera parte del citoplasma a una amiba que normalmente se dividía cada dos días. La amiba no moría, pero tampoco se dividía, pues jamás llegaba al estado de crecimiento requerido para la división celular.

La reproducción de los organismos multicelulares sólo se relaciona indirectamente con su crecimiento, pero el crecimiento es una consecuencia directa de la reproducción de sus células. En el caso de las plantas, es una cuestión controvertida el que su multiplicación vegetal se deba al crecimiento, a la multiplicación o a la regeneración. En consecuencia, ver como un solo criterio las dos habilidades del crecimiento y de la reproducción es una práctica racional.

Un sistema viviente debe tener la capacidad del cambio hereditario y, además, de la evolución, es decir, la propiedad de producir formas más y más complejas y diferenciadas, a través de una muy larga serie de generaciones sucesivas

La herencia es la capacidad de los sistemas vivientes para producir individuos idénticos o similares a ellos mismos, o para producir células madres germinales que aseguren el desarrollo de tales individuos. Sin embargo, los criterios de la reproducción incluyen la herencia, así que sería redundante considerar la herencia como un criterio distintivo.

No obstante, el mundo viviente no habría podido evolucionar si la herencia hubiera seguido reglas estrictas, es decir, si las características de los herederos siempre hubieran sido idénticas a las de los padres. En tal caso, no habrían podido surgir nuevas características en los sistemas vivientes. Por ende, la capacidad para el cambio hereditario, es decir, la aparición de características en los herederos que no se encontraban en la cadena sin fin de sus progenitores, constituye necesariamente un criterio distintivo. Esta capacidad es una condición indispen-

sable de la evolución, pero no es un prerrequisito del estado viviente del individuo. Por lo tanto, se incluye en los criterios de vida potenciales.

La capacidad del cambio hereditario es necesaria pero acaso insuficiente condición para la evolución. Prerrequisito de la evolución es la posibilidad de que puedan aparecer cambios hereditarios con “valores” diferentes (“valores” de adaptación). Generalmente es posible encontrar esta propiedad en el mundo viviente, pero no es un criterio de vida individual. Así, se incluye en los criterios de vida potenciales.

Los sistemas vivientes tienen que ser mortales

La muerte es sin duda característica de los sistemas vivientes, en el sentido de que los sistemas no vivientes no pueden morir. Sin embargo, esto sólo significa que la muerte y la vida se vinculan entre sí, formando un par de conceptos complementarios. Pero la muerte es indispensable para la vida en sentido más profundo —la muerte asegura el reciclaje de sustancias orgánicas—. Sin la muerte, todavía existirían hoy en la Tierra exactamente las mismas células primigenias que consumían la sustancia orgánica de la biosfera.

Por ende, la muerte del individuo es indispensable para el mundo viviente. Es indudablemente un criterio de vida, pero no es un criterio del estado viviente de la vida individual, puesto que esta última puede cesar sin pasar por la muerte. Por ejemplo, en el caso de la división celular mediante la fisión binaria y la mitosis (a causa del mecanismo de la replicación del ADN) una de las dos cadenas del ADN de las células hijas individuales proviene de la madre, mientras que la otra es una nueva síntesis. Las demás sustancias celulares se distribuyen estadísticamente entre las dos células hijas, las cuales por lo tanto contienen una proporción estadísticamente equivalente de las sustancias originales de la célula madre y de las nuevas sustancias sintetizadas. Por lo tanto, resultan dos células igualmente jóvenes, ninguna de las cuales puede considerarse como una célula “madre” o una célula “hija”. La vida de estas células cesa durante la división, en tal forma que no se produce un cadáver. Por ende, estas células serían potencialmente inmortales, por lo menos en vista de la continuidad de su engendramiento.

La cesación sin muerte de la vida del individuo no se limita a los organismos unicelulares; también puede ocurrir en el nivel multicelular. Existen animales multicelulares simples (por ejemplo, los pólipos de agua dulce, las planarias y las lombrices de tierra) que pueden ser cortados en dos o más pedazos a fin de que cada parte vuelva a formar un organismo completo; así, como en el caso de la división

celular, la vida del individuo original cesa, pero no hay un cadáver. Se conoce bien esta conducta en el reino vegetal (siembra de esquejes, multiplicación vegetativa).

Por ende, la muerte no es criterio de vida absoluto, sino un criterio potencial que resulta de la existencia del mundo viviente.

Todos los fenómenos clásicos de la vida (excepto el movimiento como simple cambio de lugar) están incluidos en los criterios anteriores, pero en forma más exacta y mejor definida. Además, estos criterios incluyen características que sólo fueron descubiertas por la biología molecular, tales como la regulación y el control de la información, y otros procesos. Así, los criterios de vida arriba listados prescriben, con más rigor que los clásicos fenómenos de vida, la condición “viente” de un sistema.

Ya que los criterios de vida potenciales no constituyen un prerrequisito de la vida individual, nosotros consideramos que un sistema es viviente cuando satisface los criterios de vida reales (absolutos), independientemente de su estructura material concreta o de la calidad de las sustancias químicas que lo constituyen.

Esta definición proporciona un método para considerar las leyes fundamentales de la vida de una manera general y completa, independientemente de sus manifestaciones reales. Así, esta definición no se limita a las proteínas, los ácidos nucleicos, o incluso los compuestos del carbono. Si, en el futuro, la exobiología (la ciencia de la vida fuera de la Tierra) descubre sistemas vivientes no basados en el carbono, éstos también se incluirán, sobre la base de la definición general construida a partir de los criterios de vida que hemos de resumir seguidamente.

Criterios de vida reales (absolutos):

1. Unidad inherente.
2. Metabolismo.
3. Estabilidad inherente.
4. Subsistema portador de información.
5. Control de programas.

Criterios de vida potenciales:

1. Crecimiento y reproducción.
2. Capacidad para el cambio y la evolución hereditarios.
3. Mortalidad.

NIVELES DE VIDA Y MUERTE

Introducción

La mayoría de los biólogos piensa, o a lo menos cree, que la pregunta “¿qué es la vida?” es tan sólo una pregunta filosófica abstracta, la cual yace fuera de la jurisdicción de la moderna biología. Este punto de vista no es solamente erróneo, sino definitivamente perjudicial para el desarrollo de las ciencias biológicas. Claro es, la naturaleza de la vida *sí* es una cuestión filosófica. Pero por añadidura, también es una pregunta fundamental en las ciencias naturales. La respuesta a esta pregunta es una precondition indispensable para la creación de la biología teórica. Es también una importante cuestión social, ya que numerosos problemas sociales no se habrán de solucionar sin una concreta comprensión de la naturaleza de la vida.

Los puntos de partida de las ciencias naturales comúnmente son ciertos sistemas modelo mínimos. Estos sistemas pueden mostrar, durante el desarrollo evolutivo de la materia, las propiedades específicas de una disciplina científica. Por ejemplo, las cargas electrónicas elementales (los protones y los electrones) se convirtieron en el punto de partida fundamental para las ciencias eléctricas, las moléculas para la química, las estructuras celulares elementales para la cristalografía, y los genes para la genética. Hasta que no aparecieron estos descubrimientos, la biología no tenía un sistema mínimo semejante. Sin embargo, es obvio que durante la evolución de la organización de la materia, los sistemas materiales tuvieron que alcanzar un cierto nivel o grado crítico de complejidad. Debajo de este nivel, los sistemas no son vivientes, pero más arriba empiezan a mostrar los fenómenos principales y más generales de la vida. Gánti propuso un sistema mínimo para la biología en 1971, llamándolo el *chemoton*. Para que el modelo chemoton pueda asumir el papel de un sistema mínimo en la biología, sus principios organizativos deben estar presentes en todos los seres vivientes y no deben existir en los sistemas no vivientes. Si tenemos un modelo de tal sistema mínimo, entonces la pregunta “¿qué es la vida?” ya no sigue siendo una pregunta filosófica abstracta. Es una pregunta básica en las ciencias naturales y la respuesta tiene un fundamento científico; es posible describirla con métodos matemáticos exactos y su veracidad se puede verificar con experimentos concretos. Tal modelo nos permite obtener respuestas exactas sobre la cuestión del origen de la vida, y sin este modelo ni siquiera podemos saber lo que estamos buscando.

Por añadidura, las sociedades humanas tienen numerosos problemas que no se pueden solucionar sin un conocimiento exacto de la naturaleza de la vida. Algunos de los problemas son hoy urgentes: los trasplantes, el aborto y la cuestión de la muerte clínica. Esas cuestiones tienen muchas consecuencias legales, éticas, morales y religiosas que no es posible enfrentar sin la comprensión de lo que es y no es la vida.

Explicación de algunos conceptos básicos

“¿Cuál es el rasgo característico de la vida? ¿Cuándo se considera que está viva una porción de materia?”, se preguntaba Erwin Schrödinger en su famoso opúsculo, *¿Qué es la vida?* Su respuesta fue: “cuando persiste en ‘hacer algo’, en moverse, en intercambiar cosas con su medio ambiente, etc., y durante un periodo mucho más largo de lo que pudiéramos esperar que una porción de materia inanimada ‘siguiera funcionando’ en circunstancias similares”. Esta descripción en verdad caracteriza uno de los aspectos más fundamentales de los entes vivientes. Todos los sistemas vivientes —mientras vivan— hacen algo, trabajan, funcionan. Un sistema que no hace nada no está vivo. Puede ser que no esté vivo, lo cual significa que no vive, jamás estuvo vivo, y jamás habrá de vivir. Puede ser que esté muerto, lo cual significa que pudo haber vivido anteriormente, pero ha perdido esa capacidad. O puede ser que esté en estado inactivo, lo cual significa que sería capaz de vivir pero que esta propiedad no funciona en el momento dado (por ejemplo, las bacterias congeladas o las semillas secas). Puede ser que empiece a vivir en las condiciones adecuadas. Las caracterizaciones de Schrödinger realmente se referían a la propiedad más importante de los seres vivientes.

Sin embargo, los seres vivientes no son los únicos sistemas que “hacen algo” y que además lo hacen durante largos periodos. Por ejemplo, el viento puede soplar durante periodos prolongados y los ríos hacen su trabajo erosivo continuamente. En la tecnología, los motores, los vehículos y los autómatas también son capaces de trabajar sin interrupción. Es común en estos sistemas que estén ubicados entre los niveles potenciales superior e inferior de algún tipo de energía, y que parte de la energía que fluye a través del sistema se transforme en trabajo.

No obstante, hay una diferencia esencial entre el trabajo que realiza el viento o un río y el que realiza una máquina construida por humanos o por sistemas vivientes. El trabajo de las fuerzas naturales no está dirigido: cierta condición ambiental temporal lo causa, produciendo cambios aleatorios del medio ambiente. El trabajo de las máquinas y los sistemas vivientes sí está dirigido; cierta

estructura interna, es decir, la construcción de las máquinas y los sistemas lo programa, produciendo trabajo útil para el creador (humano) o para el ente viviente.

Para pasar del trabajo aleatorio al trabajo dirigido, el flujo de energía debe conducirse a través de una serie de trayectorias obligadas dentro del sistema. Las máquinas mecánicas funcionan con medios mecánicos (por ejemplo, ruedas, ejes, resortes, péndulos), y los aparatos electrónicos mediante alambres, bobinas, rectificadores, capacitadores, etc. Lo mismo pasa si la fuerza propulsora de la máquina es la energía mecánica, como en el caso de las máquinas de vapor o los aparatos eléctricos con baterías. Aquí, la energía química primero se transforma en energía mecánica o eléctrica, y ésta sucesivamente se conduce a través de trayectorias obligadas por medios mecánicos o electrónicos.

La fuerza propulsora de los sistemas vivientes es la energía química. Lo mismo sucede con las plantas, en que la energía de la luz inicialmente se convierte en energía química. Sin embargo, a diferencia de la situación de las máquinas mecánicas, el flujo de energía en los sistemas vivientes se dirige por medios químicos. Es ésta la más importante diferencia entre las máquinas mecánicamente construidas y los sistemas vivientes. Es también la fuente de muchas propiedades especiales de los sistemas vivientes, tales como la capacidad de la formación espontánea, el crecimiento y la regeneración, pero sobre todo la capacidad de la reproducción. A diferencia de las tecnologías hechas por el hombre que basan las máquinas en los autómatas mecánicos o electrónicos, los sistemas vivientes son autómatas fundamentalmente químicos. Durante su evolución, los mecanismos de los sistemas vivientes a veces se han extendido mediante componentes mecánicos y electrónicos, pero sus estructuras básicas siguen siendo los autómatas químicos. Éstos transforman la energía propulsora mediante métodos químicos.

Ya que las reacciones químicas sólo pueden proceder con la intensidad adecuada en el estado fluido (un gas o una solución), un autómata químico sólo puede trabajar en la fase fluida, es decir, es esencial la continua presencia de algún tipo de solvente. Por esta razón los autómatas químicos también son llamados "autómatas fluidos". El funcionamiento de los autómatas mecánicos se limita al riguroso orden geométrico de sus partes, y el funcionamiento de los autómatas electrónicos también se limita a cierto ordenamiento geométrico de sus componentes. El funcionamiento de los autómatas fluidos es independiente de cualquier tipo de orden geométrico. Tienen lugar incluso si se agita la solución, o si la mitad se vierte en otro recipiente, etc. Comparadas con las de los autómatas mecánicos y eléctricos, estas propiedades les proporcionan a los sistemas vivientes muy favorables posibilidades. Una es la capacidad de la reproducción —son bien

conocidos los sistemas autocatalíticos en la química—. En las siguientes secciones habremos de considerar como máquinas fluidas los sistemas vivientes. Los niveles superiores de la evolución produjeron sistemas vivientes con componentes duros y parcialmente duros (los llamados componentes “blandos”) para manejar el flujo de la energía mecánica y eléctrica. Sin embargo, puesto que el funcionamiento fundamental de tales sistemas depende de la manipulación química, los habremos de llamar autómatas blandos.

El sistema mínimo de la vida: el chemoton

Hay algunos ejemplos de la existencia y utilización de los autómatas fluidos en la tecnología humana, pero se conocen más como reacciones químicas (o sistemas reactivos) que como autómatas fluidos. Los ejemplos de tales autómatas fluidos incluyen las bien conocidas familias de reacciones químicas oscilatorias, o los sistemas bioquímicos utilizados en la industria química para producir fosfatos de azúcar. Pero la unidad fundamental (es decir, el sistema mínimo) de la biología debe tener propiedades específicas:

- debe funcionar bajo la dirección de un programa;
- debe reproducirse a sí misma;
- debe estar separada (ésta y su progenie) del medio ambiente.

Gánti inicialmente describió este tipo de modelo en 1971, y ha seguido desarrollando la idea en subsecuentes publicaciones. Él ha llamado *chemotones* a tales autómatas fluidos.

El chemoton consiste en tres autómatas fluidos autocatalíticos (es decir, capaces de reproducirse), que se conectan entre sí estequiométricamente. El primero es el subsistema metabólico, una red de reacciones (opcionalmente complejas) de compuestos químicos que son mayormente de bajo peso molecular. Este subsistema debe ser capaz de producir no solamente todos los compuestos necesarios para reproducirse a sí mismo, sino también los compuestos requeridos para reproducir los otros dos subsistemas. El segundo subsistema es una membrana fluida de dos dimensiones que tiene la capacidad del crecimiento autocatalítico mediante la utilización de los compuestos producidos por el primer subsistema. El tercer subsistema es un sistema reactivo que es capaz de producir macromoléculas mediante la policondensación basada en patrones, utilizando los compuestos sinte-

tizados por el subsistema metabólico. Los subproductos de la policondensación también son necesarios para la formación de los componentes de la membrana. De este modo, el tercer subsistema puede controlar el funcionamiento de los otros dos mediante la vinculación estequiométrica. En su funcionamiento, los tres autómatas fluidos se convierten en un supersistema químico unificado, mediante las obligadas vinculaciones estequeométricas. Esto significa que no pueden funcionar aisladamente, al contrario del supersistema formado mediante su cooperación. Éste incluso es capaz de proliferar en un sentido geométrico riguroso, como lo ha demostrado Gánti en *Chemoton Theory* [La teoría del chemoton].

La estructura química de los chemotones se muestra en el modelo del chemoton (figura VII.1), que representa la descripción elemental simplificada de los chemotones. Es presumible que no se manifieste en esta forma, pero este modelo simple muestra todas las conexiones estequeométricas indispensables que deben estar presentes en todo tipo de estructura estequiométrica. El análisis cinético de las reacciones químicas elementales nos permite realizar con la computadora una investigación numérica exacta del funcionamiento de los chemotones. Estas investigaciones han demostrado que los chemotones se comportan como seres vivos, es decir, que satisfacen todos los criterios que caracterizan a los sistemas vivos en general (criterios de vida).

El modelo del chemoton es un modelo abstracto. Utilizándolo podemos entender cómo es posible organizar un supersistema químico a partir de varios subsistemas autocatalíticos dirigidos por un programa central, un supersistema que pueda reproducirse a sí mismo. El hecho de que sea un sistema abstracto significa que sus componentes no se limitan a compuestos químicos particulares. Sin embargo, estos compuestos deben poseer ciertas capacidades estequeométricas y deben ser capaces de producir ciertos compuestos que son importantes para el sistema entero. Cualquiera de los subsistemas simplificados del modelo puede remplazarse por una compleja red química real, si ésta es capaz de asegurar la realización de las conexiones estequeométricas requeridas. Nuestro equipo de trabajo ha construido un sistema realista de ese tipo que consiste en más de 100 componentes orgánicos diferentes. Se sabe que algunos son sustancias que existían prebióticamente; es posible la existencia bajo esas condiciones de otros componentes. Este modelo realista (a lo menos estequeométricamente) podría funcionar como un supersistema químico reproductivo controlado mediante un programa, utilizando compuestos químicos bien conocidos, los cuales existían prebióticamente, como nutrientes. Máté Hidvégi construyó la mayor parte de la red química y Eörs Szathmáry realizó los cálculos estequeométricos. Claro, este modelo prebiótico realista

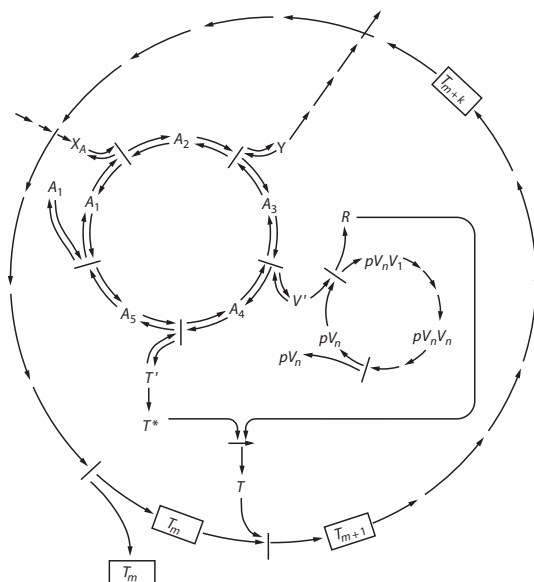


FIGURA VII.1. Modelo mínimo de chemotones.

Tres sistemas autoproducidos se vinculan estequiométricamente: ciclo $A \rightarrow 2A$, policondensación con base en patrones $pV_n \rightarrow 2pV_n$, y membrana $T_m \rightarrow 2T_m$. Esta vinculación resulta en un autómata fluido proliferante controlado por un programa, el denominado "chemoton".

no es el único viable; hay muchas otras soluciones posibles. Puesto que no hay restricciones químicas para la realización del modelo, éste podría consistir incluso en compuestos de silicio. El único prerequisite es que la química del silicio sea capaz de producir sistemas reactivos adecuados para los criterios estequiométricos del modelo del chemoton. Por lo tanto, el modelo del chemoton es capaz de representar cualquier tipo de sistema viviente, incluso los extraterrestres.

El modelo del chemoton ha sido diseñado desde abajo hacia arriba, a partir de la dirección de las reacciones químicas. La vinculación de los tres subsistemas autocatalíticos ha resultado en un supersistema controlado por un programa que puede reproducirse. Las investigaciones adecuadas han demostrado que esta estructura es capaz de satisfacer los criterios de vida. Es probable que los chemotones sean los sistemas más sencillos posibles que muestren las propiedades de la vida. En consecuencia, el modelo del chemoton, como el sistema más sencillo capaz de satisfacer los criterios de vida, puede conceptuarse como el sistema mínimo de la biología.

El modelo del chemoton posee además otra propiedad significativa. En el modelo sólo se definen las conexiones estequeométricas, es decir, solamente se definen la cualidad y la cantidad de los compuestos químicos, y se describen las vías de su formación, transformación y descomposición. El modelo no contiene ninguna prescripción o restricción sobre la velocidad de las reacciones químicas en el sistema. Por ende, permanece válido cuando las reacciones se determinan exclusivamente por las concentraciones de los componentes, o cuando en ellas influyen los efectos catalíticos, o incluso cuando los procesos se aceleran por complejos sistemas enzimáticos, como sucede en el mundo viviente hoy.

La vida en el nivel procariótico

Si lo que estamos buscando es el secreto de la vida —tratando de definir las diferencias más fundamentales entre lo animado y lo inanimado—, entonces tenemos que investigar el nivel de vida más simple y más primitivo que exista en el mundo hoy. Según nuestro actual saber, éste lo representan los procariotas. El mundo de los procariotas hoy se ha diversificado extremadamente, pues se han desarrollado hasta su actual nivel de diversidad a través de miles de millones de años. Aun así, los procariotas poseen ciertas propiedades comunes que representan las características fundamentales de su ser.

Los organismos procarióticos más simples que se conozcan son los termoplasmas y los micoplasmas, organismos completamente fluidos circundados por membranas fluidas bidimensionales. Dentro de la membrana fluida hay dos subsistemas —el citoplasma y la sustancia genética—. El citoplasma es esencialmente el subsistema metabólico que consiste en redes metabólicas de moléculas pequeñas que producen todos los componentes químicos que se requieren para el funcionamiento y la reproducción del sistema entero. Tales componentes incluyen las piezas fundamentales tanto para la formación de las membranas como para la reproducción de las sustancias genéticas. La sustancia genética contiene la información genética para el sistema entero. Por lo tanto, las bases estructurales de los micoplasmas y los termoplasmas se corresponden muy bien con el modelo del chemoton, ya que poseen los tres subsistemas requeridos —el metabólico, el membranoso y el informativo—. Estos tres subsistemas carecen de componentes sólidos; todo, incluso el subsistema limítrofe (la membrana), se encuentra en estado fluido. Sin embargo, pueden contener subsistemas adicionales que se han desarrollado durante la evolución. Tales subsistemas incluyen, por ejemplo, el sub-

sistema sintetizador de proteínas o, en algunos casos, los flagelos, que son estructuras semisólidas.

El mundo de los procariotas es muy variado. Existen muchos tipos metabólicos diferentes, desde las bacterias sulfurosas hasta las bacterias productoras de metano, y desde los organismos halófilos hasta los hipertermófilos. También muestran una variedad enorme de propiedades morfológicas. Pueden ser deformes, esféricos, como hebras o palillos, o ser espirales. Pueden carecer de movimiento o desplazarse rápidamente. Algunos solamente están circundados por membranas fluidas; otros poseen paredes celulares sólidas o incluso una concha babosa que encierra sus paredes celulares. Pero la estructura fundamental de los tres subsistemas aparece en cada uno. Durante la evolución, diversas partes y subsistemas adicionales se han incorporado en la estructura fundamental sin estorbar el funcionamiento coordinado de los tres subsistemas originales.

El modelo del chemoton puede verse como una representación adecuada de los sistemas procarióticos vivos. Podemos afirmar que, en el nivel de los procariotas, sólo son vivos aquellos sistemas que se basan en las propiedades fundamentales de la organización estequiométrica definida por el modelo del chemoton. Aunque se conocen muchos tipos diferentes del metabolismo, el cual es lo que hace posible que los procariotas vivan en una diversidad de condiciones ambientales extremas, todos deben poseer una red metabólica autocatalítica que produzca las materias primas para la formación de la membrana y que reproduzca el subsistema informativo, es decir, el subsistema genético. Además, tanto la membrana limítrofe como el subsistema de informaciones (el aparato genético) son autocatalíticos y autorreproductores, y su mutua cooperación da por resultado un supersistema químico, donde el funcionamiento coordinado proviene primordialmente de las conexiones estequiométricas entre los tres diferentes subsistemas. Todo lo demás, incluso las relaciones cinéticas químicas, se basa en estas conexiones estequiométricas.

La existencia y la cooperación de estos tres subsistemas es la condición previa para la presencia de la vida en el nivel procariótico. Si cualquiera de los tres no se presenta, el sistema no es vivo. En el caso de los virus, sólo se presenta el subsistema de informaciones y, en los virus más complejos, la membrana circundante; los virus carecen de un sistema metabólico. Los virus no pueden funcionar por sí mismos, no pueden crecer y no pueden reproducirse. Sólo pueden reproducirse al entrar en las células y obligarlas a hacer copias, produciendo virus idénticos.

De manera similar, uno puede hacer lisados a partir de los procariotas, es

decir, sustancias en las cuales las membranas celulares han sido destruidas. Tales lisados se pueden utilizar para sintetizar sustancias bioquímicas, ya que el subsistema metabólico sigue funcionando durante un tiempo. Sin embargo, ya no son sistemas vivos; no poseen la organización de los chemotones y no pueden crecer ni proliferar. Sus funciones no están dirigidas por un subsistema de información, sino sólo por las reglas generales de la química.

Así, con la ayuda del modelo del chemoton, podemos definir claramente la diferencia entre los sistemas vivos y los no vivos en el nivel procariótico.

La vida en el nivel animal

Por lo menos existen dos tipos diferentes de vida. Yo quiero repetir y enfatizar esto: podemos identificar al menos dos tipos diferentes de vida. Debo hacer hincapié en que esta afirmación no es una hipótesis, sino que representa la experiencia cotidiana en la biología y la medicina. Sin embargo, hasta donde yo pueda saberlo, nadie ha reconocido aún, o al menos afirmado, este hecho. Debido a que esta importante cuestión no se ha expuesto claramente, el concepto de los dos tipos de vida se confunde con otros fenómenos, tanto en las aplicaciones científicas como en las cotidianas. Sabemos que tras la muerte de un organismo, sus órganos, tejidos y células permanecen vivos durante un tiempo. Por esta razón es posible hacer trasplantes de órganos humanos, y también por esta razón es posible producir cultivos de células y de tejidos. Si consideramos que la muerte no es otra cosa que el fin irreversible de una vida, entonces lógicamente debemos concluir que la vida de un humano o un animal no es igual a la vida de sus órganos, tejidos y células.

También hay una diferencia de estructura en ambos tipos de vida, es decir, la vida de un animal y la vida de sus células. La vida en el nivel procariótico es característica de los sistemas que se organizan directamente a partir de procesos químicos para convertirse en entes vivos. La vida en el nivel metazoario es característica de los sistemas que se han organizado directamente como entes vivos a partir de células, las cuales también son entes vivos. Tales sistemas, en que la materia posee una organización jerárquica superior a la que existe en las células, emplean procesos tanto químicos como mecánicos y electrónicos en la utilización de energía.

La vida es siempre la propiedad de un ente. Esto significa que, por ejemplo, es imposible cortar en dos una célula procariótica en tal forma que ambas mitades

permanezcan vivas. Hay algunos casos excepcionales (por ejemplo, los anélidos) que se pueden explicar.

Podríamos acaso definir como vida primaria la vida en el nivel procariótico, al cual hemos caracterizado utilizando el modelo del chemoton. La vida en el nivel metazoico, es decir, la vida de esos “supersistemas biológicos” cuyas unidades elementales son las células vivientes mismas, se puede definir como vida secundaria. Resulta significativo que la estructura de los tres subsistemas definida por el modelo del chemoton sea también característica de los sistemas de vida secundaria. Todo ente animal tiene un subsistema que gobierna la estructura geométrica (la piel, los huesos), todos tienen un subsistema que gobierna los procesos metabólicos, es decir, el suministro y la transformación de los nutrientes para el animal (tracto digestivo, órganos secretorios, circulación sanguínea), y todos tienen un subsistema de información y control (el sistema nervioso) para asegurar el funcionamiento coordinado de los órganos bajo las condiciones internas y ambientales dadas. Naturalmente, como en el caso de los procariotas, se pueden añadir a los tres subsistemas fundamentales diversas partes adicionales o subsistemas, a fin de satisfacer los requerimientos o las condiciones de vida especiales. Al parecer, la organización mediante tres subsistemas del modelo del chemoton, que produce los fenómenos calificados de vida en el nivel procariótico, también produce fenómenos similares en los niveles superiores de la jerarquía organizadora de la materia. Tales fenómenos se han calificado de “vida” en diversos idiomas a lo largo de los tiempos históricos.

Todo animal viviente representa dos tipos de vida en cada momento de su existencia: la vida primaria de sus células y la vida secundaria de su cuerpo. La vida secundaria es la verdadera vida del animal. Sin embargo, el óvulo, que contiene toda la información sobre un animal viviente, no muestra ni contiene cualesquiera fenómenos relacionados con su vida secundaria. Por lo tanto, debemos concluir que la vida de un animal no empieza en su óvulo o en la fertilización, sino que se inicia durante el desarrollo embriológico al mismo tiempo que el subsistema informativo (el sistema nervioso) comienza a controlar el funcionamiento de los otros dos subsistemas. De la misma manera, el animal muere en el momento que su subsistema informativo irreversiblemente deja de controlar los otros dos subsistemas. Por esta razón, es correcto, en la práctica médica, asignar el momento de la muerte a la irreversible cesación de la función cerebral. Y también es la razón de que sea incorrecto considerar que el óvulo fertilizado es un ser humano viviente. La vida humana sólo comienza cuando el sistema nervioso central empieza a controlar al conjunto de las células embrionarias durante el desarrollo

del embrión. Los laboratorios que trabajan en la inseminación artificial desechan de tiempo en tiempo los óvulos fertilizados pero no utilizados, aunque esta práctica no puede verse como una masacre.

Entre y más allá

Los procariotas y los metazoarios son únicamente dos partes del mundo viviente. Una parte considerable del mundo viviente yace entre ambos: la enorme diversidad de células eucariotas y de hongos, y el mundo de las plantas. Hasta aquí, no hemos investigado desde nuestro punto de vista estas partes del mundo viviente. No obstante, con base en nuestro saber actual, podemos establecer algunas conclusiones generales.

La organización de las células eucariotas concuerda con el modelo del chemoton. No es una contradicción que su información (subsistema [sustancia genética]) se encuentre en una unidad especial (núcleo) cubierta con una membrana; el modelo del chemoton sólo define las conexiones estequeométricas y nada dice sobre las estructuras geométricas. Los requerimientos estequeométricos se cumplen en las células en la misma forma exactamente como se cumplen en el caso de los procariotas. La presencia de organelos celulares con su subsistema informativo (cloroplastos, mitocondrias) podría causarnos algún problema, pero su presencia se explica perfectamente por la teoría endosimbiótica. Las células eucariotas no parecen tener ningún tipo de vida secundaria que se pueda truncar sin la interrupción (muerte) de la vida primaria de la célula.

En los organismos multicelulares existe una situación interesante en el caso de los hongos y de las plantas. Tienen dos subsistemas, uno que gobierna la estructura geométrica y otro que gobierna los procesos metabólicos. La conexión entre los dos subsistemas se corresponde con los requerimientos del modelo del chemoton. En tales subsistemas, de la misma manera que con los animales, los componentes estructurales no son las reacciones químicas directas, sino las células que tienen su propia (primaria) vida. Se podría esperar que estos organismos tuvieran algún tipo de vida secundaria. Sin embargo, la experiencia muestra que tal vida secundaria no existe en las plantas y los hongos: es imposible matarlos en la misma forma que se puede matar a los animales. No es posible cortar en dos a los animales a fin de que ambas partes permanezcan vivas; pero se puede cortar las plantas en muchos pedazos, cada uno de los cuales sigue vivo. Algunas plantas se propagan de esta manera en la agricultura (proliferación vegetativa). Es así

porque en las plantas y los hongos no ha evolucionado un sistema informativo secundario. Toda la información en las plantas y los hongos se almacena en el ADN de sus células y ningún subsistema de informaciones nuevo se ha desarrollado más allá de ese nivel. Por ende, la vida de las plantas y los hongos no es más que la colaboración coordinada de la vida primaria de sus células. La experiencia humana refleja este hecho: varios idiomas tienen palabras para nombrar el acto de matar a la gente o a los animales, pero ninguno para el de matar a las plantas o los hongos. Similarmente, algunas religiones orientales se preocupan por la vida de los animales, pero no por la vida de las plantas.

¿Qué se encuentra más allá del nivel de la organización de la vida animal? Del mismo modo que las células eucariotas, como unidades vivientes, son los elementos constitutivos de un sistema, desarrollando así un nivel superior en la jerarquía organizativa de la materia, es posible que se pueda desarrollar una organización cooperativa funcional entre los organismos multicelulares. Esto también sería una innovación; niveles todavía más altos de la organización evolutiva podrían crearse utilizando los organismos multicelulares como elementos constitutivos.

La evolución ya ha empezado a avanzar en esta forma. En un primer experimento, la evolución produjo las familias, y, subsecuentemente, los rebaños y las hordas se desarrollaron evolutivamente a partir de diversos grupos de animales. Tal vez las sociedades de insectos representen el nivel superior en este proceso evolutivo. Por ejemplo, un hormiguero muestra un nivel organizativo tan alto, que en él aparecen incluso sus propios procesos metabólicos: las hormigas introducen alimentos en el hormiguero, cultivan hongos con ellos, crían piojos vegetales, retiran los detritus, etc. Todas estas actividades equivalen a un subsistema metabólico en este nivel de la jerarquía organizativa. También se presenta la separación geométrica, ya que el hormiguero es su bien delimitado territorio. Podemos ver que dos de los tres subsistemas del modelo chemoton ya se encuentran en el hormiguero como ente. La cuestión es si los hormigueros tienen o no un subsistema de informaciones o de control. En varios idiomas se habla de la "vida" de los hormigueros, pero no hay prueba alguna de la existencia de alguna forma de vida terciaria, más allá de los niveles primario y secundario.

Con la aparición de los humanos se han desarrollado los sistemas supraindividuales, que sin duda poseen la organización caracterizada por los tres subsistemas del modelo chemoton. Estos sistemas son los Estados-naciones que se han desarrollado durante la historia humana. Sus procesos metabólicos son la industria, la agricultura, el tráfico, el comercio, etc.; poseen fronteras bien delimitadas,

y también un subsistema informativo-controlador en la forma de las autoridades legales y ejecutivas. ¿Podría ser posible que la formación de los Estados-naciones a lo largo de la historia no haya sido otra cosa que el más reciente experimento de la evolución para crear sistemas de vida terciaria, además de los sistemas de vida primaria y secundaria? ¿Quién sabe?

SEGUNDA PARTE

EL ORIGEN Y LA AMPLITUD
DE LA VIDA NATURAL

Los capítulos de esta sección exponen algunas ideas científicas contemporáneas en torno a dos cuestiones: cómo las formas de vida conocidas que existen en la Tierra se originaron mediante procesos físicoquímicos a partir de materiales no vivientes, y cómo las formas de vida conocidas podrían diferir de otras formas de vida que existan naturalmente. Nuestros conocimientos científicos sobre la vida natural se limitan a la vida actual en la Tierra: los microbios (bacterias verdaderas, arqueobacterias y protistas —los paramecios, por ejemplo—), los hongos, las plantas y los animales. Para bien o para mal, tales organismos son el fundamento de nuestro paradigma de la vida porque representan los únicos especímenes de la vida que realmente conocemos. En nuestra comprensión de la vida en general, incluso de las posibles vida artificial y vida extraterrestre, influye mucho lo que los biólogos y los bioquímicos han descubierto sobre la vida en la Tierra. Además, el hacer preguntas específicamente biológicas inevitablemente incita otras más profundas y filosóficas. El alcance de estos capítulos no se limita, por lo tanto, al tema de esta sección. En conjunto, relacionan ciertos descubrimientos biológicos y bioquímicos importantes y a veces menospreciados, con algunas de las preguntas más antiguas sobre la vida.

Las cuestiones filosóficas inevitablemente aparecen en cuanto se empieza a indagar el origen y la amplitud de la vida. La biología y la bioquímica promueven preguntas filosóficas de carácter general sobre la vida, tales como las siguientes: ¿cuáles son las presuposiciones sobre la vida que se han insertado en las diferentes ideas respecto a cómo surgió ésta, o respecto a qué tipo de formas de vida podrían existir? ¿Qué validez le podemos dar a tales presuposiciones? ¿Cuáles (si alguna) de estas presuposiciones son verdaderamente esenciales para cualquier forma de vida, y cuáles representan las contingencias físicas y químicas que existieron en el momento del origen de la vida conocida, presumiblemente en la Tierra primigenia? De hecho, ¿desde qué perspectiva podemos siquiera determinar lo que es y no es aleatorio en la vida? ¿Podemos hacer algo para liberar nuestra idea de la vida de los prejuicios provenientes de los accidentes de nuestras circunstancias epistémicas?

Otras cuestiones filosóficas surgen en el contexto de los paradigmas científicos

cos específicamente relacionados con la naturaleza, el origen y la extensión de la vida. Los primeros biólogos fueron naturalistas. Sus observaciones los convencieron de que la vida se diferencia de los entes no vivientes por características funcionales abstractas, especialmente la capacidad para 1) autoorganizarse y mantener su autoorganización durante un periodo prolongado frente a las perturbaciones internas y externas, y 2) reproducirse y transmitir a su progenie las modificaciones heredables; tales observaciones se basaban en Aristóteles (capítulo I de este libro). Con el desarrollo de la física clásica el énfasis se desplazó a la cuestión de cómo podrían concretarse, en el contexto del sistema físico newtoniano, las características funcionales de la vida, como lo ilustran los textos de René Descartes e Immanuel Kant en la primera parte. Pero desgraciadamente la física clásica no resultó ser de gran utilidad en el esclarecimiento de esta cuestión. No fue sino hasta el desarrollo en el siglo XX de la bioquímica y la biología molecular que los biólogos empezaron a progresar sustancialmente en la comprensión de la base material de la vida. Descubrieron que las características funcionales de nivel superior que sus predecesores habían identificado con las esenciales para la vida se realizan mediante un ordenamiento cooperativo complejo en que se involucran las proteínas y los ácidos nucleicos. Las preguntas sobre el origen y la extensión de la vida se volvieron a plantear sobre la base de la bioquímica y la biología molecular; Alexander Oparin (capítulo V) y Ernst Mayr (capítulo VI) tuvieron un papel principal en este proceso. Sus ideas se reflejan en los ensayos contemporáneos de Orgel (capítulo VIII) y Shapiro (capítulo IX) sobre el origen de la vida, y de Pace (capítulo XI) y Benner, Ricardo y Carrigan (capítulo XII) sobre la posible estructura molecular de la vida en otros planetas.

El planteamiento molecular sobre el origen y la amplitud de la vida produjo nuevas preguntas filosóficas, tales como las siguientes: ¿es gradual o abrupta la transición desde un conjunto no viviente de moléculas hasta un ente viviente primitivo? ¿Es posible dar una explicación de la naturaleza de la vida independiente de una explicación del origen de la vida? Esta última pregunta es particularmente imperiosa en el contexto del carácter histórico de la teoría de la evolución mediante la selección natural de Darwin. (Regresamos a estas cuestiones más adelante.) Otra preocupación filosófica todavía mayor es la suposición de que la comprensión de la naturaleza general de la vida, sin importar el lugar y la época donde se la pueda encontrar, yace en el nivel de las moléculas y los procesos bioquímicos, y no en el de las propiedades organizativas y funcionales de nivel superior. Esta suposición excluye la posibilidad de que ciertas formas de vida artificial, por ejemplo los sistemas de *software* exclusivamente informáticos, se consideren

vivientes; véase la tercera parte. Pero incluso suponiendo que la vida es fundamentalmente bioquímica, se puede preguntar además si es posible explicar sus peculiares características organizativas y funcionales con base en la bioquímica solamente. Esto plantea la cuestión de si algunas de las propiedades de nivel superior de la vida son *emergentes*, es decir, si representan propiedades autónomas nuevas que aparecen espontáneamente en ciertos niveles de la complejidad molecular. Algunos científicos y filósofos piensan que sí. El problema está en explicar bien el concepto de la emergencia; véase la compilación de Bedau y Humphreys¹ de artículos en torno a este tema.

Algunas de las discusiones en esta parte sobre la naturaleza bioquímica de la vida son bastante técnicas, pero bien vale la pena el esfuerzo por entenderlas. Daremos seguidamente un breve resumen de la bioquímica y la biología molecular que podrá proporcionarles a los lectores sin grandes conocimientos científicos algunos conocimientos básicos. La vida como la conocemos hoy en la Tierra implica una compleja coordinación de dos tipos de grandes moléculas que contienen carbono: las proteínas y los ácidos nucleicos. Las proteínas suministran la mayor parte del material estructural para la construcción de los organismos, así como el material catalítico (enzimático) para propulsarlos y mantenerlos. Los ácidos nucleicos, por otra parte, almacenan (ADN o ARN) y procesan (ARN) la información hereditaria requerida en la reproducción y en la síntesis de la enorme cantidad y variedad de proteínas que un organismo necesita durante su vida. El proceso crucial de la coordinación de ambas funciones, es decir, la traducción del material hereditario almacenado en los ácidos nucleicos, como proteínas para el crecimiento, el mantenimiento y la reparación, corre a cargo de los ribosomas, diminutos pero intrincadamente estructurados dispositivos moleculares (compuestos tanto de proteínas como de ARN) que se encuentran en grandes cantidades en todas las células. En una palabra, toda la vida conocida en la Tierra utiliza las mismas macromoléculas (las proteínas y los ácidos nucleicos) y la misma arquitectura básica molecular (los ribosomas), a fin de manifestar las características funcionales abstractas que desde los tiempos de Aristóteles se consideran esenciales en la vida.

Las similitudes moleculares entre los organismos de la Tierra contemporáneos no terminan, sin embargo, en el nivel de las proteínas y los ácidos nucleicos. Una proteína típicamente consiste en 50 a 1000 aminoácidos que los enlaces peptídicos unen como una larga cadena o polímero; la figura 1 muestra dos aminoácidos unidos por un enlace peptídico. Los aminoácidos son moléculas comple-

¹ M. A. Bedau y P. Humphreys (comps.), *Emergence: Contemporary Readings in Philosophy and Science*, MIT Press, Cambridge, 2008.

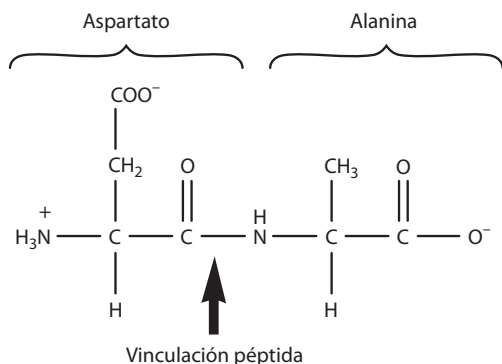


FIGURA 1. Diagrama esquemático de Shelley Copley que muestra un enlace peptídico entre dos aminoácidos, el aspartato y la alanina.

jas que consisten en dos grupos funcionales, un grupo aminobásico ($-\text{NH}_2$) y un grupo ácido ($-\text{COOH}$). Existen más de 100 tipos diferentes de aminoácidos, y sin embargo la vida en la Tierra (desde la bacteria más simple hasta el más majestuoso de los árboles o el más talentoso de los seres humanos) construye sus proteínas primordialmente con los mismos 20. Al igual que muchos objetos tridimensionales, los aminoácidos son asimétricos y por lo tanto poseen la propiedad geométrica de la diferenciación especular física llamada “quiralidad” por los químicos. Se ha convenido en denominar “I” (o izquierdo) a uno de los dos ordenamientos quirales, y al otro “D” (o derecho). La vida conocida en la Tierra sólo utiliza aminoácidos I para sus proteínas, pero no hay en la bioquímica razones para pensar que la vida no pueda utilizar los aminoácidos D en vez de aquéllos, o, de hecho, una serie alternativa de aminoácidos (véase Benner, Ricardo y Carrigan, capítulo XII).

Los ácidos nucleicos son largos polímeros compuestos de nucleótidos, en vez de aminoácidos. Un nucleótido consiste en tres subunidades moleculares, una unidad de fosfato enlazada con una unidad de azúcar (la ribosa en el ARN y la desoxirribosa en el ADN), las cuales a su vez se enlazan con una unidad base. Con la excepción de algunos virus, que utilizan el ARN, el ADN es el depósito de la información genética. El ARN supervisa el intrincado proceso de traducir la información codificada en el ADN, en las proteínas que el organismo puede utilizar de inmediato. Cada hebra de la famosa doble hélice del ADN consiste en una secuencia de moléculas individuales enlazadas covalentemente en la forma de una larga cadena mediante unidades de azúcar (A) y fosfato (P) (figura 2). Los enlaces de hidrógeno entre sus respectivas bases nucleótidas vinculan las dos hebras (figura 3). El ADN utiliza cuatro bases estándar —la adenina (A), la timina (T), la guanina (G) y la citosina (C)— para codificar la información hereditaria. Estas bases

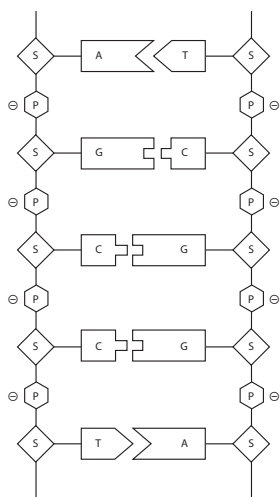


FIGURA 2. Diagrama esquemático que muestra la estructura de una porción desplegada de una molécula de ADN. Tomado de Steven A. Benner, *Life, the Universe and the Scientific Method*. © Steven A. Benner.

forman un patrón complementario; C se empareja con G, y A con T. El ARN utiliza el uracilo (U) en vez de la timina, y tiene típicamente una sola hebra, aunque contiene regiones dobladas que permiten que se enlacen bases complementarias en la misma hebra. Sin embargo, Benner, Ricardo y Carrigan indican en el capítulo XII que los bioquímicos han identificado siete bases más que podrían utilizarse, pero no se utilizan por la vida conocida en la Tierra. A causa de su esquema de emparejamiento complementario de las bases, cada hebra del ADN es un patrón para la reconstrucción de la otra mitad. La estructura de dos hebras complementarias permite que un simple mecanismo realice la replicación de las moléculas de ADN, y también proporciona una importante fuente de duplicación en caso de que una hebra se dañe.

La información hereditaria se encuentra codificada en tan sólo uno de las hebras del ADN (la hebra “codificadora”) mediante secuencias de tres bases consecutivas. Cada tríada de bases (el codón) designa un aminoácido específico, o, alternativamente, el inicio o el término de la construcción de una cadena de aminoácidos que forma una proteína. Con algunas excepciones menores, toda la vida conocida en la Tierra utiliza el mismo código genético, donde las mismas tríadas de bases codifican los mismos aminoácidos. Pero no hay razón para pensar que un esquema de codificación diferente no se hubiera podido utilizar. La información en la hebra codificadora del ADN se transcribe en una molécula especial (mensajera) del ARN, transportándose a un ribosoma para ser traducido como una proteína. Es poco probable que la vida primigenia en la Tierra utilizara

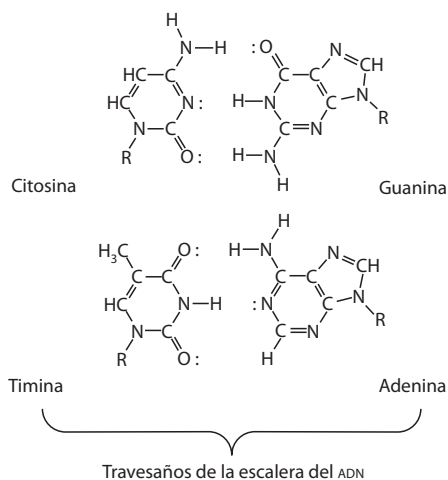


FIGURA 3. Diagrama esquemático que muestra la estructura molecular de dos travesaños (bases nucleótidas emparejadas) de una molécula de ADN. Tomado de Steven A. Benner, *Life, the Universe and the Scientific Method*.

© Steven A. Benner.

ribosomas para traducir la información hereditaria como materiales estructurales y catalíticos, porque los ribosomas son “máquinas” moleculares increíblemente complejas, compuestas tanto de proteínas como de ARN. El origen de los ribosomas es uno de los grandes misterios de la vida en la Tierra.

Como se expone en los capítulos de esta parte, las similitudes funcionales, moleculares, y bioquímicas entre los organismos terrestres contemporáneos proporcionan el trampolín para las especulaciones científicas sobre la forma en que la vida emerge en la materia no viviente bajo condiciones naturales, y sobre la forma en que la física y la química limitan las posibilidades de la existencia de la vida en cualquier otro lugar del universo. También suscitan nuevas preguntas filosóficas. Como ya lo sugerimos antes, una de las preguntas se relaciona con la cuestión de si —y, de ser así, en qué forma— la comprensión de la naturaleza de la vida presupone la del origen de la vida. Este tipo de conexión la propuso explícitamente Oparin (capítulo v) y muchos científicos contemporáneos aceptan la idea de manera implícita. Por ejemplo, Pace (capítulo xi), un partidario de la teoría del mundo del ARN sobre el origen de la vida, alega que toda la vida en el universo probablemente ha utilizado o utilizará una molécula orgánica genética muy semejante a los ácidos nucleicos de la vida conocida.

Pero esta idea se presta al cuestionamiento. En primer lugar, no es verdad en general que la comprensión de la naturaleza de una cosa presupone la comprensión de cómo hacerla. Para dar un ejemplo, la composición química del cuarzo (SiO_2) era conocida mucho antes de que alguien supiera cómo era producido por

los procesos volcánicos naturales. Pero acaso la naturaleza de los sistemas biológicos es distinta a la de las sustancias químicas como el cuarzo. Uno puede imaginar una argumentación evolucionista que propusiera que, a diferencia de los compuestos químicos inanimados, la vida es una entidad histórica y su origen es esencial en su naturaleza. De manera similar, Tibor Gánti (capítulo VII) identifica el problema de entender la naturaleza de la vida con el de caracterizar totalmente la vida mínima, alegando que la forma de vida primigenia en la Tierra ejemplifica la vida conocida.

La consideración adecuada de estas argumentaciones es delicada. Alguien podría sostener que el metabolismo es una (o incluso la más) esencial propiedad de la vida y aun así aceptar una explicación del origen de la vida basada en los genes, pensando en el hecho de que los sistemas químicos requieren información genética a fin de generar y mantener el tipo de autoorganización necesaria para el metabolismo (véase Orgel, capítulo VIII). Según esta idea, la versión más austera del mundo del ARN (una comunidad evolutiva de moléculas de ARN que se autorreplican) podría entenderse como una etapa crucial en la emergencia de la vida, pero no de la vida misma. Así, sería un error asumir que la evidencia para una teoría del origen de la vida basada en la primacía de los genes o del metabolismo, también se pudiera entender como la evidencia para una definición o explicación genética o metabólica de la vida. (La cuarta parte se extiende en la cuestión de las definiciones y explicaciones de la vida.) Estos argumentos exigen un cuidadoso examen, clarificación y evaluación por el lector.

En el capítulo VIII, el biólogo Leslie Orgel identifica dos cuellos de botella en nuestra comprensión de la emergencia de la vida en la Tierra: 1) la fuente de las materias primas moleculares básicas de la vida, y 2) la identidad y el origen del primer polímero biológico que se construyó a partir de éstas. El primero no es tan serio como el segundo, porque existen tres conjeturas muy plausibles empíricamente fundamentadas sobre el abastecimiento de pequeñas moléculas orgánicas, tales como los aminoácidos y los ácidos nucleicos básicos, en la Tierra primigenia: *i*) su síntesis en una “sopa prebiótica”; *ii*) su entrega por meteoritos (cometas y asteroides), y *iii*) su síntesis mediante procesos hidrotérmicos en los ductos de ventilación volcánicos de las profundidades marítimas. Los tres procesos pudieron haber desempeñado un papel en la cuestión.

Para Orgel, el problema más difícil es el del origen de la primera macromolécula biológica. Como muchos otros biólogos contemporáneos, él piensa que es necesaria la información hereditaria para organizar y sustentar las largas secuencias de reacciones químicas requeridas en el metabolismo; véase también Pace

(capítulo xi), Benner, Ricardo y Carrigan (capítulo xii), y el informe del National Research Council [Consejo Nacional de Investigaciones] (capítulo xv). Es claro que Orgel adopta una explicación del origen de la vida basada en la primacía de los genes. La cuestión es qué tipo de polímero constituyó las primeras estructuras genéticas. Como la mayoría de los científicos que hoy se ocupan del origen de la vida, Orgel refrenda la teoría del mundo del ARN. Propuesta en el decenio de 1960 por C. R. Woese,² L. E. Orgel³ y F. Crick,⁴ la teoría del mundo del ARN sostiene que la primera aparición de la vida en la Tierra consistía en pequeñas moléculas de ARN que se autorreplicaban. Sin embargo, Orgel concede que la síntesis abiótica (no biológica) de los oligómeros (polímeros muy pequeños) a partir de los nucleótidos, en las condiciones geoquímicas que probablemente existían en la Tierra primigenia, supone serios problemas. Orgel describe algunas estructuras genéticas alternativas que pudieron haber precedido al ARN, como el p-ARN y el ANP, admitiendo que tampoco hubieran sido fáciles de sintetizar bajo condiciones naturales. Su conclusión es que aún tenemos que descubrir el polímero genético original y que éste pudo haber sido sustancialmente distinto a los ácidos nucleicos que se utilizan en la vida terrestre contemporánea. No obstante, él piensa que fue orgánico; discute brevemente y desecha la radical propuesta de A. G. Cairns-Smith de que las primeras estructuras genéticas fueron cristales de arcilla inorgánicos⁵ que proporcionaron un templete catalítico para la construcción de oligómeros de ARN y que con el tiempo fueron remplazados por éstos mediante un “golpe genético”. Pero sea cual fuere la identidad del primer polímero genético, Orgel, como muchos biólogos, está convencido de que el mundo del ARN representa una etapa crucial en el desarrollo de la evolución de la vida como la conocemos hoy en la Tierra.

Atacando con tesón y desde todos los ángulos la verosimilitud del mundo del ARN, el bioquímico Robert Shapiro argumenta en el capítulo ix que la síntesis abiótica de los nucleótidos y los oligómeros a partir de elementos químicos básicos bajo condiciones naturales (*versus* el laboratorio) es tan improbable que se debería desechar como una mera fantasía. A la luz de estas consideraciones, él defiende un planteamiento sobre la emergencia de la vida basado primordialmente en el metabolismo. Según Shapiro, la vida primigenia consistía en redes auto-

² C. R. Woese, *The Genetic Code: The Molecular Basis for Genetic Expression*, Harper & Row, Nueva York, 1967.

³ L. E. Orgel, “Evolution of the Genetic Apparatus”, *Journal of Molecular Biology*, 38: 381-393, 1968.

⁴ F. Crick, “The Origin of the Genetic Code”, *Journal of Molecular Biology*, 38: 367-379, 1968.

⁵ A. G. Cairns-Smith, *Genetic Takeover and the Mineral Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1982.

organizadas de pequeñas moléculas orgánicas (suministradas por meteoritos, procesos hidrotérmicos, etc.) enlazadas con una fuente de energía externa (muy posiblemente, procesos geoquímicos). Así, la autoorganización química (del tipo requerido por la vida) no presupone una estructura genética, a pesar de que se pudiera pensar, señala Shapiro, que tal sistema químico debía poseer un “genoma composicional”.

Como se comentó en la introducción a la primera parte, Oparin (véase el capítulo v) es el padre de las teorías del origen de la vida basadas primordialmente en el metabolismo. Este planteamiento no es tan popular hoy en día como la propuesta que se basa primordialmente en los genes, acaso porque sus partidarios no han adoptado conjuntamente una versión específica de su teoría, como lo han hecho los partidarios de una explicación basada primordialmente en los genes adoptando el mundo del ARN. Se han propuesto muy diferentes versiones en años recientes, incluidos los “sistemas de reacción lejos del equilibrio” (capítulo xxx), el “mundo lípido”,⁶ el “mundo de pirita-hierro”,⁷ los sistemas metabólicos autocatalíticos de C. de Duve,⁸ y la “teoría del doble origen”.⁹ A pesar de sus extraordinarios contrastes, Shapiro piensa que todas estas teorías basadas primordialmente en el metabolismo asumen totalmente las siguientes cinco condiciones: 1) algún tipo de contorno delimitador para la selección, concentración y protección de las biomoléculas y sus elementos constitutivos básicos; 2) una fuente de energía para la propulsión del proceso de organización molecular; 3) un mecanismo para el acoplamiento de la liberación de energía con el proceso de la organización molecular; 4) una red química que permita la adaptación y la evolución, y 5) una red química que crezca y se reproduzca.

Las cinco condiciones de Shapiro revelan que él por lo menos confía implícitamente en la importancia de las dos características funcionales que desde los tiempos de Aristóteles se le han atribuido a la vida, a pesar de pensar que el metabolismo (basado en procesos químicos autoorganizados en que se involucran pequeñas moléculas orgánicas) fue anterior a la síntesis de los polímeros genéticos. En general, resulta iluminador examinar si las ideas del origen de la vida basadas primordialmente en el metabolismo, como las de Shapiro, y las ideas basadas primordialmente en los genes, como las de Orgel, presuponen conceptos

⁶ D. Segré *et al.*, “The Lipid World”, *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, 31: 119-145, 2001.

⁷ G. Wächtershäuser, “Groundworks for an Evolutionary Biochemistry: The Iron-Sulfur World”, *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 58: 85-201, 1992.

⁸ C. de Duve, *Blue Print for a Cell: The Nature and Origin of Life*, Neil Patterson Publishers, Burlington, 1991.

⁹ F. Dyson, *Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.

fundamentalmente diferentes de lo que es la vida. Según Shapiro, hay pocas razones para creer que toda la vida en el universo comparte la misma química básica, como sucede con la vida conocida en la Tierra; se puede calificar de vida cualquier concentración de pequeñas moléculas, orgánicas o no, que cumplan con las cinco condiciones por él establecidas. Él ha llegado a la conclusión de que, dependiendo del medio ambiente, podría haber muchas vías químicas diferentes para llegar a la vida, y que la vida probablemente es un fenómeno común en el universo.

Shapiro atribuye la idea sorprendentemente frecuente entre los científicos (y que asume enteramente el National Research Council en el capítulo xv) de que la vida en la Tierra representa un “feliz accidente”, a la muy amplia aceptación del extremadamente improbable mundo del ARN. En el capítulo x la filósofa Iris Fry señala que no hay una gran diferencia entre la idea del accidente feliz y la versión creacionista del origen de la vida. Ambos apartan el origen de la vida del ámbito de la investigación científica. Iris Fry alega que los científicos deberían aceptar sin reservas una tesis de la continuidad que propone que “no hay un abismo insalvable entre el sistema inorgánico y el viviente, y, si se dan las circunstancias físicas adecuadas, la emergencia de la vida es altamente probable”. La tesis de la continuidad representa un planteamiento filosófico similar al del naturalismo filosófico, pero se relaciona directamente con el origen de la vida. Fry alega que la tesis de la continuidad tiene un enorme valor heurístico, en la medida que exige que todos los científicos llenen ciertas lagunas epistemológicas cruciales en sus teorías del origen de la vida con procesos químicos y físicos específicos, en vez de invocar “milagros científicos” para no tomarlas en cuenta. Teorías diferentes del origen de la vida obviamente se enfrentan a diferentes retos, y por lo tanto requieren soluciones químicas y físicas correspondientemente diferentes. Pero el progreso genuinamente científico en el problema de cómo la vida emerge de las sustancias químicas no vivientes, requiere mecanismos fisicoquímicos específicos que llenen las lagunas. Si uno no emplea la tesis de la continuidad en sus investigaciones, el estatus científico de éstas disminuye, ya que es la teoría que tenga menos lagunas fisicoquímicas la que puede proporcionar la mejor explicación *científica* del origen de la vida. El resto del capítulo de Fry muestra cómo varias y diversas teorías del origen de la vida, desde los planteamientos basados en los genes hasta los basados en el metabolismo, utilizan la tesis de la continuidad para explicar la emergencia de la vida. A diferencia de Shapiro, para ella el mundo del ARN no es tan inverosímil como para que viole la tesis de la continuidad, pero sí está de acuerdo con él en que es muy problemático. El capítulo de Fry es notable

porque reúne varias tesis diferentes del origen de la vida, subrayando sus virtudes y sus debilidades, e identificando los problemas que aún no se han resuelto. Es obvio que ella favorece las teorías híbridas que implican la coevolución de las proteínas y de los ácidos nucleicos.

En el capítulo XI, el microbiólogo Norman Pace refrenda de manera explícita la definición genética de la vida, explicándola como la capacidad de un sistema químico para la autorreplicación y la evolución (darwiniana) mediante la selección natural. Pace utiliza esta definición en sus argumentos sobre la universalidad de nuestra bioquímica básica, alegando que no hay otras opciones químicas verosímiles en la construcción de sistemas físicos capaces de reproducirse, adaptarse y evolucionar mediante la selección natural. Según Pace, toda la vida natural, dondequiera que se encuentre en el universo, consiste en complejas macromoléculas orgánicas (que contienen carbono) compuestas de subunidades simples que se repiten. Muchas de estas subunidades (por ejemplo, los aminoácidos, los azúcares de 5-carbono, y las bases nucleotídicas) probablemente fueron muy similares (acaso incluso iguales) a nuestras biomoléculas. Pace piensa que entre los organismos que han descendido de orígenes de la vida alternativos se habrán de encontrar diferencias, pero que éstas habrán de existir en los niveles superiores, en la estructura de las macromoléculas ensambladas con las subunidades básicas, es decir, los mecanismos (por ejemplo, los ribosomas) utilizados en el ensamblaje de las macromoléculas, y las vías bioquímicas específicas en que participan las macromoléculas.

Puesto que piensa que toda posible vida es semejante a la vida conocida de la Tierra, Pace cree que las formas de vida de la Tierra, especialmente los microbios (que muestran una diversidad metabólica y una tolerancia al medio ambiente extremas), proporcionan un buen modelo para reflexionar sobre la vida extraterrestre. Con base en lo que sabemos sobre la gama de condiciones que tolera la forma de vida terrestre “más dura” y más versátil, uno puede inferir que los requerimientos mínimos para un medio ambiente “habitable” incluyen, entre otras cosas, CO₂ como fuente de carbono, y agua como solvente. Consecuentemente, los aparatos para la búsqueda de la vida extraterrestre, que probablemente sea microbiana, deben enfocar la identificación de los elementos básicos de la vida conocida, por ejemplo, los aminoácidos bióticos y las bases nucleotídicas. Él también recomienda la utilización de técnicas de secuenciación de genes, porque cree que es éste el nivel (las diferencias en las secuencias de codones) en que la vida en otros lugares del universo probablemente difiere de nuestra vida. Es interesante que Pace crea que la vida en otros lugares de nuestro Sistema Solar probablemente comparta

con la nuestra un ancestro común que se debió transportar por meteoritos a través del Sistema Solar.

Al igual que Pace, el bioquímico Steven Benner y sus colegas (capítulo XII) fundamentan su discusión del posible origen químico de la vida en una definición genética, específicamente la “definición química darwiniana” de la NASA, semejante a la definición de Pace. No obstante, Benner, Ricardo y Carrigan no están convencidos de que las opciones químicas para construir un sistema que cumpla con esta definición sean tan pocas como piensa Pace. Ellos proponen que esa definición conlleve una jerarquía de requerimientos generales de la vida química, una lista de los cuales proponen en orden de importancia descendente: 1) el desequilibrio termodinámico (la vida requiere una fuente de energía); 2) el enlazamiento químico (para conjuntar las subunidades de macromoléculas biológicas); 3) el aislamiento (para seleccionar, concentrar y proteger las biomoléculas frágiles); 4) un andamiaje de la especie del carbono (para construir los polímeros complejos requeridos en las propiedades estructurales, catalíticas y hereditarias de la vida); 5) patrones energéticos en el metabolismo (que aprovechan los desequilibrios químicos mediante reacciones descendentes de muchos pasos que se van acercando al equilibrio); 6) un solvente (para acelerar las reacciones químicas mediante la separación de compuestos en partes reactivas, transportándolos a otras ubicaciones y poniéndolos en contacto).

Benner y sus colegas exploran después las diferentes posibilidades químicas que puedan cumplir con tales requerimientos bajo una amplia gama de condiciones ambientales que se encuentran fuera de la Tierra, incluidas las de Venus, las de la luna Titán de Saturno, las de los gigantes gaseosos como Júpiter, las de los planetas expulsados de sistemas solares, e incluso las de los gases en el espacio interestelar. Su conclusión es que (en las condiciones adecuadas) la vida podría utilizar el silicio en lugar del carbono para el andamiaje de sus biomoléculas, y que la vida podría existir en una sorprendentemente amplia variedad de ambientes, aprovechando casi cualquier desequilibrio termodinámico como fuente de energía y utilizando diversos solventes distintos al agua. Según Benner y sus colegas, aunque la vida en ambientes semejantes al de la Tierra indudablemente usa el carbón como andamiaje y el agua como solvente, los únicos requerimientos “absolutos” de la vida (tal como se establece en la definición química darwiniana) son el desequilibrio termodinámico y las temperaturas adecuadas para el enlazamiento químico. Así, aunque Benner y sus colegas están de acuerdo con Pace respecto a la naturaleza intrínseca de la vida, sin embargo no coinciden respecto a las posibilidades químicas de la vida en otros lugares del universo.

El microbiólogo Kenneth Nealson ha participado extensamente en el diseño de aparatos para la detección de la vida utilizados en las misiones espaciales de la NASA. Al igual que Pace y Benner y sus colegas (y muchos otros científicos), Nealson piensa que el primer paso en la teorización sobre la vida extraterrestre o la búsqueda de la vida extraterrestre es la formulación de una definición general de la vida; véase Cleland y Chyba (capítulo xxvi) para un argumento contra el planteamiento definicional. Sin embargo, a diferencia de Pace y de Benner y sus colegas, Nealson no avala ninguna definición específica. En cambio, en el capítulo xiii él basa sus argumentos sobre las estrategias de la detección de la vida en lo que los biólogos han aprendido recientemente sobre el mundo microbiano de la Tierra.

Tanto Nealson como Pace creen que casi toda la vida en el universo es microbiana. No sólo es ubicua la presencia de los microbios en la Tierra, sino que éstos son la forma de vida más antigua, más diversa y más longeva en la Tierra. Hay evidencias de que aparecieron hace 3 800 millones de años, y el registro de los fósiles indica que fueron la única forma de vida durante más de 2 000 millones de años. Los microbios también son notables por su diversidad metabólica y su tolerancia ambiental. A diferencia de los animales y las plantas, que se limitan a la materia orgánica y a la luz, los microbios metabolizan una amplia gama de sustancias químicas, incluidos el monóxido de carbono, el hierro ferroso, el sulfato de hidrógeno y el hidrógeno. Los microbios también son mucho más resistentes, multiplicándose en condiciones de pH, temperatura, salinidad, radiación y sequedad que ninguna planta o ningún animal podrían tolerar. En una palabra, los microbios nos han enseñado que la vida puede aprovechar una mayor variedad de recursos energéticos y puede tolerar una gama mucho más amplia de condiciones químicas o físicas que lo que anteriormente se pensaba. Esto explica por qué Nealson y muchos otros científicos creen que la vida microbiana es probablemente la forma de vida más común en el universo, y que por lo tanto deberían ser el objetivo de cualquier búsqueda de vida extraterrestre. Sin embargo, a diferencia de Pace, Nealson no niega la posibilidad de la existencia de microbios con una composición química exótica. A fin de minimizar la centralidad de la Tierra en la indagación, él recomienda la búsqueda de estructuras de composición elemental constante que estén químicamente desequilibradas en relación con su medio ambiente, en vez de la caza de elementos o moléculas específicos. Esto da a entender que Nealson considera que el metabolismo (interpretado generalmente como el mantenimiento de la autoorganización frente a las perturbaciones ambientales) es una propiedad universal, y acaso la más esencial, de los sistemas vivientes.

La filósofa Carol Cleland y el bioquímico Shelley Copley alegan en el capítulo xiv que la Tierra misma es un buen lugar para buscar formas “alienígenas” de vida microbiana; véase también P. C. W. Davies y C. H. Lineweaver¹⁰ y C. E. Cleland.¹¹ La suposición de que toda la vida en la Tierra hoy en día comparte la misma arquitectura molecular y bioquímica básica es parte del paradigma de la biología moderna. Pero como señalan Cleland y Copley, ésta tan extendida suposición tiene muy poco sustento teórico o empírico. Los científicos saben que la vida pudo haber sido por lo menos algo diferente en el nivel molecular (utilizando aminoácidos distintos para construir sus proteínas, distintas bases nucleótidas en su ADN, etc.), y es obvio que los procesos abióticos (meteoritos, procesos hidrotermales, etc.) le suministraron a la Tierra elementos básicos y alternativos para la vida. Si la emergencia de la vida es altamente probable en las condiciones químicas y físicas adecuadas, como muchos científicos lo creen, entonces parece posible que la Tierra primigenia haya alojado múltiples orígenes de la vida, algunos de los cuales produjeron variedades químicas de la vida que conocemos. Con frecuencia se afirma que incluso si éste fuera el caso, los descendientes de un origen alternativo de la vida hace mucho tiempo que habrían sido eliminados por nuestra forma de vida, en la implacable competencia por la obtención de recursos, o amalgamados en una sola forma de vida (la vida conocida en la Tierra) mediante la transferencia genética horizontal. Los autores del informe del National Research Council (capítulo xv), por ejemplo, respaldan esta idea. Cleland y Copley la rechazan, argumentando que se opone a lo que los microbiólogos han descubierto en los últimos años sobre la complejidad y la diversidad de las comunidades microbianas. Otro argumento que con frecuencia se plantea contra la posible existencia de formas de vida alternativas es que ya las deberíamos de haber detectado con los métodos avanzados que emplean los microbiólogos contemporáneos. Como señalan Cleland y Copley, las herramientas utilizadas en la exploración del mundo microbiano (la microscopía con técnicas de teñido de moléculas, los cultivos y los métodos genómicos complejos como la amplificación por PCR de los genes ARN) no han podido detectar incluso una forma ligeramente diferente de vida microbiana. En vista de estas consideraciones y de la profunda importancia filosófica y científica que tal descubrimiento representaría, ellos alegan que la hipótesis de que la Tierra contemporánea contiene una “bios-

¹⁰ P. C. W. Davies y C. H. Lineweaver, “Finding a Second Life Sample on Earth”, *Astrobiology*, 5: 154-163, 2005.

¹¹ C. E. Cleland, “Epistemological Issues in the Study of Microbial Life: Alternative Terran Biospheres?”, *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Science*, 38: 847-861, 2007.

fera clandestina” de formas no conocidas de vida microbiana se merece una atenta consideración científica.

La piedra angular de esta segunda parte es la breve pero amplia e importante introducción del informe del National Research Council, *Los límites de la vida orgánica en los sistemas planetarios* (capítulo xv). Este capítulo proporciona una visión de conjunto del saber científico más reciente en relación con las posibilidades y los límites de la vida natural y de la vida no natural —o, como los autores la denominan, la vida “extraña”—. Al igual que Cleland y Chyba (capítulo xxvi), el National Research Council se abstiene de refrendar una definición en particular de la vida. En su lugar, los autores listan algunas de las características de la vida conocida de la Tierra y examinan cuáles aparentemente caracterizan la vida entera. Admiten la idea de que la evolución darwiniana es esencial para la vida, punto de vista que Dawkins (capítulo xxix) defiende y que muchos biólogos comparten. Sin embargo, algunos de sus argumentos en pro del darwinismo universal parecen confundir los problemas sobre la naturaleza de la vida con los del origen de la vida (la necesidad de un sistema genético para lograr y mantener los procesos metabólicos). Al igual que Nealson y Benner y sus colegas, y la mayoría de los autores en las demás secciones de este libro, el National Research Council busca una concepción de la vida que evite la centralidad de la Tierra. Los científicos saben que hay muchas formas en que la vida basada en el carbono podría ser diferente de la vida terráquea conocida, y admiten la posibilidad de un tipo de vida basada en un andamiaje de silicio, en lugar de carbono. Pero estas posibilidades se infieren de lo que sabemos sobre la biología molecular y la bioquímica de la vida conocida en la Tierra, de modo que es posible que no se haya agotado toda la gama de las posibilidades para la vida. El comité termina sus argumentos con la identificación de algunos problemas que hay que solucionar si hemos de entender verdaderamente los límites de la vida química en el universo.

El capítulo del National Research Council sobre la vida extraña incluye una interesante discusión de las formas de vida robóticas y las formas de vida puramente informáticas basadas en las computadoras (éstas son la vida artificial “blanda” y la vida artificial “dura” que se discuten en la tercera parte). Los autores alegan que la “vida” robótica y la “vida” exclusivamente informática, si es que existen, indudablemente tendrían que haber sido diseñadas por alguna otra forma preexistente de vida inteligente, tal como los seres humanos; esto refleja la idea, común entre muchos biólogos, de que la selección natural es el mecanismo fundamental de la evolución de la vida y la inteligencia primigenias en el universo. Por lo tanto, concluyen que la pertinencia de las formas de vida robóticas o

exclusivamente informáticas para el *origen* de la vida es irrelevante. Sin embargo, el National Research Council concede que su conclusión podría ser un mero reflejo de la estrechez de nuestras actuales presuposiciones sobre la vida. Para una amplia discusión de la cuestión de si la vida computacional podría, a pesar de todo, iluminar la *naturaleza* de la vida, véanse los ensayos de la tercera parte.

BIBLIOGRAFÍA

- Bedau, M. A., y P. Humphreys (comps.), *Emergence: Contemporary Readings in Philosophy and Science*, MIT Press, Cambridge, 2008.
- Benner, S. A., *Life, the Universe, and the Scientific Method*, Steven A. Benner Foundation Press, Gainesville, 2008.
- Cairns-Smith, A. G., *Genetic Takeover and the Mineral Origin of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
- Cleland, C. E., "Epistemological Issues in the Study of Microbial Life: Alternative Terran Biospheres?", *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Science*, 38: 847-861, 2007.
- Crick, F., "The Origin of the Genetic Code", *Journal of Molecular Biology*, 38: 367-379, 1968.
- Davies, P. C. W., y C. H. Lineweaver, "Finding a Second Sample of Life on Earth", *Astrobiology*, 5: 154-163, 2005.
- Duve, C. de, *Blueprint for a Cell: The Nature and Origin of Life*, Neil Patterson Publishers, Burlington, 1991.
- Dyson, F., *Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- Orgel, L. E., "Evolution of the Genetic Apparatus", *Journal of Molecular Biology*, 38: 381-393, 1968.
- Segré, D., D. Ben-Eli, D. W. Deamer y D. Lancet, "The Lipid World", *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, 31: 119-145, 2001.
- Wächtershäuser, G., "Groundworks for an Evolutionary Biochemistry: The Iron-Sulfur World", *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 58: 85-201, 1992.
- Woese, C. R., *The Genetic Code: The Molecular Basis for Genetic Expression*, Harper & Row, Nueva York, 1967.

Leslie E. Orgel*

VIII. EL ORIGEN DE LA VIDA: UN RESUMEN DE LOS DATOS Y LAS ESPECULACIONES**

EL PROBLEMA del origen de la vida en la Tierra mucho tiene en común con una bien armada novela policiaca. No se carecen de pistas que indiquen la forma en que se cometió el crimen, la contaminación de la prístina pureza del medio ambiente de la Tierra primigenia. Muy al contrario, son demasiadas las pistas y demasiados los sospechosos. Sería difícil encontrar dos investigadores que estuvieran de acuerdo sobre las líneas generales de los sucesos que ocurrieron hace tanto tiempo y que posibilitaron la subsecuente evolución de la vida en toda su variedad. Aquí he de resumir dos de las preguntas principales y parte de la evidencia contradictoria que se ha utilizado en los esfuerzos por responderlas. Primero, sin embargo, resumiré las contadas áreas respecto a las cuales hay un acuerdo aproximadamente general.

La Tierra tiene algo más de 4500 millones de años. Durante más o menos el primer medio millón de años tras su formación, recibió el impacto de objetos lo suficientemente grandes como para evaporar los océanos y esterilizar el suelo.¹ Han sido descubiertos microfósiles bien preservados de organismos cuya morfología es similar a la de las algas verdes azules actuales y que tienen una antigüedad de cerca de 3500 millones de años,² y existen evidencias indirectas pero convincentes de que la vida ya había aparecido hace 3800 millones de años.³ Por lo tanto, la vida se originó en o se transportó a la Tierra en cierto momento dentro

* Este trabajo recibió el apoyo de la NASA (número de subsidio NAG5-4118) y de la NASA NSCORT/EXOBIOLGY (número de subsidio NAG5-4546). Quiero agradecer a Aubrey R. Hill su asistencia técnica y a Berenice Walker su trabajo en el manuscrito.

** Este artículo apareció originalmente en *Trends in Biochemical Sciences*, 23: 491-495, 1998. © Elsevier, 1998.

¹ N. H. Sleep *et al.*, "Annihilation of Ecosystems by Large Asteroid Impacts on Early Earth", *Nature*, 342: 139-142, 1989; C. F. Chyba, "The Violent Environment of the Origin of Life: Progress and Uncertainties", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 3351-3358, 1993.

² J. W. Schopf, *The Earth's Earliest Biosphere: Its Origin and Evolution*, Princeton University Press, Princeton, 1993.

³ S. J. Mojzsis *et al.*, "Evidence for Life on Earth before 3800 Million Years Ago", *Nature*, 384: 55-59, 1996.

de un marco temporal de unos cuantos cientos de millones de años que se abrió hace 4000 millones de años. La mayoría de los estudiosos que investigan este campo rechazan la hipótesis de que la vida fue traída a la Tierra desde otro lugar de la galaxia y dan por descontado que la vida empezó *de novo* en la Tierra primigenia.

La uniformidad de la bioquímica en todos los organismos vivientes respalda firmemente la idea de que todos los organismos modernos descienden de un último ancestro común (UAC). El análisis detallado de las secuencias de proteínas sugiere que el UAC poseía una complejidad comparable a la de una simple bacteria moderna y que vivió hace 3 200 a 3 800 millones de años.⁴ Si conociéramos las etapas de la evolución del UAC a partir de los componentes abióticos que había en la Tierra primitiva, podríamos explicar totalmente el origen de la vida. En la práctica, los estudios más ambiciosos sobre los orígenes de la vida se plantean preguntas mucho más sencillas. Aquí, yo examino dos. ¿Cuáles fueron las fuentes de las pequeñas moléculas orgánicas que constituyeron los primeros sistemas que pudieron autorreplicarse? ¿Cómo evolucionó la organización biológica a partir de un abastecimiento abiótico de pequeñas moléculas orgánicas?

LA SÍNTESIS ABIÓTICA DE PEQUEÑAS MOLÉCULAS ORGÁNICAS

En una época en que la mayoría de la gente creía que la atmósfera de la Tierra primigenia había sido fuertemente reductora, S. L. Miller, un estudiante de posgrado, colaborador de Harold Urey, dio inicio a la era moderna del estudio del origen de la vida. Miller⁵ sometió una mezcla de metano, amoníaco e hidrógeno a una descarga eléctrica e introdujo los productos en agua líquida, demostrando que un por ciento sustancial del carbono en la mezcla gaseosa se había incorporado en un grupo relativamente pequeño de moléculas orgánicas simples y que varios de los aminoácidos naturalmente producidos figuraban de manera destacada entre aquellos productos. Fue un resultado sorprendente; los químicos orgánicos hubieran esperado que se diera una mezcla de productos mucho menos controlable. Los experimentos Urey-Miller fueron ampliamente aceptados como un modelo de la síntesis prebiótica de aminoácidos mediante la acción de los relámpagos.

Miller y sus asistentes luego estudiaron más detalladamente la síntesis de

⁴ D.-F. Feng, G. Cho y R. F. Doolittle, "Determining Divergence Times with a Protein Clock: Update and Reevaluation", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94: 13028-13033, 1997.

⁵ S. L. Miller, "A Production of Amino Acids under Possible Primitive Earth Conditions", *Science*, 117: 528-529, 1953.

CH_2O	$\xrightarrow{\text{Ca(OH)}_2}$	Azúcares, incluida una pequeña cantidad de ribosa
$\text{CH}_4 \cdot \text{NH}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	$\xrightarrow{\text{Descarga eléctrica}}$	Aminoácidos, incluida glicina
HCN	$\xrightarrow{\text{Amoníaco acuoso}}$	Adenina
$\text{HC} \equiv \text{C} - \text{C} \equiv \text{N}$	$\xrightarrow{\text{Cianato o urea}}$	Citosina

FIGURA VIII.1. *Síntesis prebióticas tempranas de biomonómeros.*

aminoácidos mediante descargas eléctricas.⁶ Utilizando técnicas analíticas más profundas, pudieron identificar muchos más aminoácidos —algunos de los cuales, aunque ciertamente no todos, se dan en los organismos vivientes—. También demostraron que una importante vía sintética hacia los aminoácidos se produce mediante la reacción Streicker —es decir, a partir de aldehídos, cianuro de hidrógeno y amoníaco—. La glicina, por ejemplo, se forma a partir del formaldehído, la cianida y el amoníaco —todos los cuales se pueden detectar entre los productos formados en la reacción producida por la descarga eléctrica—.

En los años tras los experimentos de Urey-Miller, la síntesis de moléculas biológicamente interesantes a partir de productos que se podían obtener en una mezcla de gases reductores se convirtió en el objetivo principal de la química prebiótica (véase la figura VIII.1). Fue notable la síntesis de adenina a partir de cianuro de hidrógeno y amoníaco que J. Oró⁷ logró realizar. Tiempo después, J. P. Ferris, A. Sánchez y L. E. Orgel,⁸ mostramos que el cianoacetileno es uno de los productos principales de la acción de una descarga eléctrica en una mezcla de metano y nitrógeno, y que el cianoacetino es una fuente plausible de las bases pirimidínicas uracilo y citosina. Este nuevo informe, junto con las investigaciones anteriores que mostraron que los azúcares se forman fácilmente a partir del formaldehído,⁹

⁶ D. Ring *et al.*, "Prebiotic Synthesis of Hydrophobic and Protein Amino Acids", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 69: 765-768, 1972; Y. Wolman, H. Haverland y S. L. Miller, "Nonprotein Amino Acids from Spark Discharges and their Comparison with the Murchison Meteorite Amino Acids", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 69: 809-811, 1972.

⁷ J. Oró, "Synthesis of Adenine from Ammonium Cyanide", *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2: 407-412, 1960.

⁸ J. P. Ferris, A. Sánchez y L. E. Orgel, "Studies in Prebiotic Synthesis III. Synthesis of Pyrimidines from Cyanoacetylene and Cyanate", *Journal of Molecular Biology*, 33: 693-704, 1968.

⁹ A. Butlerow, "Formation synthétique d'une substance sucrée", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 53: 145-147, 1861; A. Butlerow, "Bildung einer zuckerartigen Substanz durch Synthese", *Justus Liebigs Annalen der Chemie*, 120: 295-298, 1861.

a muchos investigadores de los orígenes de la vida les convenció de que por fin se podía entender cuál había sido la primera etapa de la aparición de la vida en la Tierra: la formación de una sopa prebiótica de biomonómeros.

Sin embargo, como en cualquier novela policiaca, el principal sospechoso, la atmósfera reductora, tiene una coartada. Algunos trabajos recientes han convencido a la mayoría de los científicos interesados en la cuestión de que la atmósfera de la Tierra primigenia jamás pudo haber sido tan reductora.¹⁰ Si esto es cierto, son irrelevantes los experimentos de Miller, así como la mayoría de las primeras investigaciones de la química prebiótica. Yo creo que es prematuro el rechazo de la atmósfera reductora, ya que no entendemos completamente la historia primigenia de la atmósfera terrestre. Resulta difícil creer que la facilidad con que se forman en las condiciones de una atmósfera reductora los azúcares, aminoácidos, purinas y pirimidinas sea una coincidencia o una pista falsa sembrada por un creador malicioso.

Muchos de los que descartan la posibilidad de una atmósfera reductora creen que el crimen fue cometido por un extraño. Una parte sustancial de los meteoritos que caen en la Tierra pertenecen a la clase de las condritas carbonosas.¹¹ Éstas son particularmente interesantes porque contienen una cantidad significativa de carbono orgánico y algunos de los aminoácidos y de las bases de los ácidos nucleicos típicos. ¿Pudo tener su origen la sopa prebiótica en la materia orgánica preformada que los meteoritos y los cometas trajeron a la Tierra?

Los partidarios de la teoría del impacto han alegado convincentemente que en los meteoritos y cometas que alcanzaron la superficie de la Tierra primigenia tenía que haber el suficiente carbono orgánico para una sopa abundante. No obstante, ¿habría sobrevivido esta materia al intenso calor que acompaña el ingreso de cuerpos grandes en la atmósfera y a su subsecuente impacto en la superficie de la Tierra? Los resultados de los cálculos teóricos dependen mucho de las suposiciones respecto a la composición y la densidad de la atmósfera, el tamaño de los cuerpos, etc.¹² La teoría del impacto es probablemente la más popular en la actualidad, pero nadie ha podido probar que los impactos fueron la fuente más importante de compuestos orgánicos prebióticos.

¹⁰ J. F. Kasting, "Earth's Early Atmosphere", *Science*, 259: 920-926, 1993.

¹¹ J. R. Cronin, S. Pizzarella y D. P. Cruikshank, "Organic Matter in Carbonaceous Chondrites, Planetary Satellites, Asteroids and Comets", en J. F. Kerridge y M. S. Mathew (comps.), *Meteorites and the Early Solar System*, University of Arizona Press, Tucson, 1988, pp. 819-857.

¹² C. Chyba y C. Sagan, "Endogenous Production, Exogenous Delivery and Impact-Shock Synthesis of Organic Molecules: An Inventory for the Origins of Life", *Nature*, 355: 125-132, 1992.

Los nuevos sospechosos son los ductos en el fondo de los mares, grietas submarinas en el suelo de la Tierra donde agua supercaliente rica en iones metálicos de transición y en sulfito de hidrógeno se mezcla abruptamente con la fría agua marina. Tales ductos son lugares de abundante actividad biológica, gran parte de ella independiente de la energía solar. G. Wächtershäuser¹³ ha propuesto un escenario para el origen de la vida que podría ubicarse en ese medio. Su hipótesis es que la reacción entre el sulfito de hierro (II) y el sulfito de hidrógeno (una reacción que produce piritas $[\text{FeS}_2]$ e hidrógeno) podría proporcionar la energía libre necesaria para la reducción del dióxido de carbono a moléculas capaces de sustentar el origen de la vida. Él afirma que la vida se originó en la superficie de los sulfitos de hierro como resultado de esa síntesis. Las suposiciones de que los ciclos metabólicos complejos se autoorganizan en la superficie y de que los productos pertinentes jamás se escapan de ella son partes esenciales de esta teoría; según Wächtershäuser, ¡jamás existió una sopa prebiótica!

Setter y sus colegas¹⁴ han confirmado la nueva propuesta de que el sulfito de hidrógeno, en presencia del sulfito de hierro (II), se comporta como un agente reductor. Ellos han reducido, por ejemplo, la acetalina al etano y el ácido mercaptoacético al ácido acético, pero no han registrado la reducción del CO_2 . Sin embargo, G. Wächtershäuser y C. Huber¹⁵ han demostrado recientemente que el FeS fortalecido con NiS reduce el monóxido de carbono. Dado que probablemente hubo grandes cantidades de monóxido de carbón en los gases que salían de los ductos, los resultados de Wächtershäuser podrían ser importantes. Si se pudiera demostrar que los sulfitos metálicos son capaces de catalizar la síntesis de una suficiente diversidad de moléculas orgánicas a partir del monóxido de carbono, la teoría de los ductos sobre el origen de los biomonómeros podrá llegar a ser muy atrayente.

En resumen, hay tres teorías principales (para no mencionar las menos populares) en la contienda sobre el origen prebiótico de los biomonómeros. Ninguna es convincente y ninguna se puede descartar de buenas a primeras. Acaso ha llegado el tiempo de una teoría de la conspiración; algunas de las fuentes molecu-

¹³ G. Wächtershäuser, "Before Enzymes and Templates: Theory of Surface Metabolism", *Microbiological Reviews*, 52: 452-484, 1998; G. Wächtershäuser, "Groundworks for an Evolutionary Biochemistry: The Iron-Sulfur World", *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 58: 85-201, 1992.

¹⁴ E. Blöch *et al.*, "Reactions Depending on Iron Sulfite and Linking Geochemistry and Biochemistry", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89: 8177-8120, 1992.

¹⁵ C. Huber y G. Wächtershäuser, "Activated Acetic Acid by Carbon Fixation on (Fe, Ni)S under Primordial Conditions", *Science*, 276: 245-247, 1997.

lares antes examinadas pudieron haber colaborado entre sí para hacer posible el origen de la vida.

LA AUTOORGANIZACIÓN

No existe un acuerdo general sobre la fuente de las moléculas orgánicas prebióticas en la Tierra primigenia, pero existen varias teorías verosímiles, todas respaldadas por datos experimentales. La situación respecto a la evolución de un sistema que pueda autorreplicarse es menos satisfactoria; hay por lo menos igual número de sospechosos, pero prácticamente no hay datos experimentales.

La aceptación más o menos generalizada de la hipótesis de que alguna vez hubo un mundo del ARN (es decir, un mundo biológico independiente donde las moléculas funcionaban a la vez como materiales genéticos y como catalizadores semejantes a las enzimas) ha cambiado la orientación de las investigaciones sobre los orígenes de la vida.¹⁶ Hoy se considera que el enigma central es el origen del mundo del ARN. Dos preguntas específicas, aunque entrelazadas, son centrales en el debate. ¿Fue el ARN el primer material genético o la precedieron uno o varios materiales genéticos más sencillos? ¿Hasta qué grado es posible la autoorganización de las secuencias reactivas sin la participación de un material genético? Yo me concentraré en la primera pregunta.

La suposición de que haya existido un polímero que funcionaba a la vez como un material genético y como la fuente de una actividad catalítica semejante a la enzimática modifica profundamente los objetivos de la síntesis prebiótica. La cuestión central se convierte en la de la síntesis de los primeros monómeros genéticos: los nucleótidos o cualquier cosa que los haya precedido. La síntesis de los aminoácidos, las coenzimas, etc., se convierte en un asunto secundario porque no hay razón para creer que jamás fueran sintetizados abióticamente; algunos o todos ellos podrían haberse introducido como consecuencia directa o indirecta de las actividades aparentemente enzimáticas del ARN o de su precursor o precursores. Los partidarios de la hipótesis de que el ARN fue el primer material genético tienen que explicar de dónde vinieron los nucleótidos y cómo se autoorganizaron. Los que creen en la existencia de un precursor más sencillo tienen la difícil tarea de identificar a ese precursor, pero ellos conciben la esperanza de que entonces sería menos difícil explicar la síntesis de los monómeros.

¹⁶ R. F. Gesteland y J. F. Atkins, *The RNA World: The Nature of Modern RNA Suggests a Prebiotic World*, Cold Spring Harbor Laboratory Press, Long Island, 1993.

Para seguir con el argot de la novela policiaca, las evidencias acumuladas sugieren que el ARN, el principal sospechoso, pudo haber completado la difícil tarea de organizarse a sí mismo como un sistema independiente capaz de replicarse. Ha sido posible aislar en un *pool* genético de ARN fragmentario las secuencias que catalizan una amplia variedad de reacciones orgánicas.¹⁷ En relación con el origen del mundo del ARN, las reacciones más importantes son aquellas en que una hebra preformada de ARN-templete cataliza la síntesis de su complemento a partir de monómeros u oligómeros cortos. Eklund y sus colegas¹⁸ han aislado con sorprendente facilidad los catalizadores para el ligamiento de oligonucleótidos cortos, y estos catalizadores realizan el ligamiento con especificidad adecuada. Estas moléculas son los equivalentes de ARN de las ARN-ligasas y las ADN-ligasas. También se ha avanzado considerablemente en la selección de los equivalentes de ARN de las ARN-polimerasas.¹⁹

Si el mundo del ARN evolucionó *de novo*, tuvo que depender inicialmente de una fuente abiótica de nucleótidos activados. Sin embargo, la oxidación-reducción, la metilación, la síntesis oligosacárida, etc., sustentadas por una coenzima nucleotídica, probablemente se convirtieron en parte de la química del ARN antes de la invención de la síntesis de las proteínas. Desgraciadamente, no podemos imaginar cuán complejo pudo haber sido el mundo del ARN hasta que no sepamos más sobre la gama de reacciones que las ribozimas pueden catalizar. Parece probable que el ARN pudo haber catalizado casi todos los pasos involucrados en la síntesis de nucleótidos,²⁰ y posiblemente el acoplamiento de reacciones redox con la síntesis de fosfodiésteres y péptidos, pero esto aún tiene que demostrarse experimentalmente.

Los experimentos sobre la selección de ribozimas que catalizan la replicación del ácido nucleico (arriba expuesta) utilizan como insumos *pools* de moléculas de ARN sintetizadas por enzimas. Recientemente, Ferris y sus colegas²¹ han logrado

¹⁷ T. Pan, "Novel and Variant Ribozymes Obtained through in Vitro Selection", *Current Opinion in Chemical Biology*, 1: 17-25, 1997; R. R. Breaker, "DNA Aptamers and DNA Enzymes", *Current Opinion in Chemical Biology*, 1: 26-31, 1997.

¹⁸ E. H. Eklund, J. W. Szostak y D. P. Bartel, "Structurally Complex and Highly Active RNA Ligases Derived from Random RNA Sequences", *Science*, 269: 364-370, 1995.

¹⁹ E. H. Eklund y D. P. Bartel, "RNA-Catalysed RNA Polymerization Using Nucleoside Triphosphates", *Nature*, 382: 373-376, 1996.

²⁰ P. J. Unrau y D. P. Bartel, "RNA-Catalysed Nucleotide Synthesis", *Nature*, 395: 260-263, 1998.

²¹ J. P. Ferris y G. Ertem, "Montmorillonite Catalysis of RNA Oligomer Formation in Aqueous Solution: A Model for the Prebiotic Formation of RNA", *Journal of the American Chemical Society*, 115 (26): 12270-12275, 1993; K. Kawamura y J. P. Ferris, "Kinetic and Mechanistic Analysis of Dinucleotide and Oligonucleotide Formation from the 5'-Phosphorimidazolidine of Adenosine on NA+-Montmorillonite", *Journal of the American Chemical Society*, 119: 7564-7572, 1994.

considerables avances en el ensamblaje de oligómeros de ARN a partir de monómeros, utilizando un mineral arcilloso, la montmorillonita, como catalizador. Los sustratos que han utilizado, nucleósido 5'-fosforimiditos, probablemente no fueron moléculas prebióticas, pero los experimentos sí indican que la utilización de minerales como adsorbentes y catalizadores podría permitir la acumulación de largos oligonucleótidos cuando se pudiera disponer de monómeros activos adecuados. Nosotros hemos demostrado que es posible la copia no enzimática de una amplia gama de secuencias oligonucleótidas utilizando monómeros activados²² y hemos obtenido resultados similares, pero menos extensos, en el ligamiento de oligómeros cortos.

Un optimista podría proponer la siguiente trama. Primero, los mononucleótidos se oligomerizan en la montmorillonita o en un material equivalente. Luego, la copia de los templates más largos, utilizando monómeros u oligómeros cortos como sustratos, conduce a la acumulación de una biblioteca de moléculas de ARN de doble hebra. Finalmente, una doble hélice de ARN, una de cuyas hebras ha generalizado la actividad de la ARN-polimerasa, se disocia; la hebra de la polimerasa copia su complemento a fin de producir la segunda molécula de polimerasa, la cual copia la primera para producir el segundo complemento, y así sucesivamente. Por lo tanto, el mundo del ARN pudo haber surgido en un charco de nucleótidos activados.²³ ¡Sólo hubiera sido necesario un charco de nucleótidos activados!

Los nucleótidos son moléculas complejas. La síntesis de azúcares a partir del formaldehído nos proporciona una mezcla compleja en que la ribosa es siempre un componente menor. La formación de un nucleósido a partir de una base y un azúcar no es una reacción fácil y no se ha logrado bajo condiciones prebióticas, por lo menos en el caso de los nucleósidos pirimidínicos; la fosforilación de los nucleósidos tiende a dar una mezcla compleja de productos.²⁴ La inhibición, en los templates-D por los sustratos-L, de las reacciones basadas en templates, presenta aún otra dificultad.²⁵ Es casi inconcebible que la replicación del ácido nucleico pudiera haberse iniciado, a menos que hubiera habido un mecanismo mucho más sencillo para la síntesis prebiótica de los nucleótidos. Eschenmoser y sus

²² A. R. Hill Jr., T. Wu y L. E. Orgel, "The Limits of Template-Directed Synthesis with Nucleotide-5'-Phosphoro (2-methyl)imidazolides", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 23: 285-290, 1993.

²³ L. E. Orgel, "The Origin of Life on Earth", *Scientific American*, 271: 52-61, 1994.

²⁴ J. P. Ferris, "Prebiotic Synthesis: Problems and Challenges", *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, LII: 29-39, 1987.

²⁵ G. F. Joyce *et al.*, "Chiral Selection in Poly(C)-Directed Synthesis of Oligo (G)", *Nature*, 310: 602-604, 1984.

colegas²⁶ han tenido considerable éxito en la generación de ribosa 2,4-difosfato en una reacción potencialmente prebiótica a partir del monofosfato glicolaldehído y el formaldehído. Por lo tanto, no es imposible que la química original lograra la síntesis prebiótica directa de los nucleótidos. No obstante, es más probable que algún tipo de forma organizada de la química haya precedido al mundo del ARN. Esto nos conduce a una discusión del derrocamiento genético.

Cairns-Smith,²⁷ mucho antes de que el argumento se popularizara, subrayó la improbabilidad de que una molécula tan *high tec* como el ARN pudiera haber aparecido *de novo* en la Tierra primitiva. Él propuso que la primera forma de vida fue una arcilla con la capacidad de la autorreplicación. También propuso que la síntesis de moléculas orgánicas se convirtió en parte de la estrategia competitiva del mundo de la arcilla y que el genoma inorgánico fue derrocado por una de sus creaciones orgánicas. El postulado de una forma de vida inorgánica no ha logrado ningún tipo de sustentación experimental. Esta idea vive en el limbo de las hipótesis no investigadas. Sin embargo, Cairns-Smith también consideró la posibilidad de que uno o más genomas orgánicos lineales precedieran al ARN.²⁸ Aunque esta idea se ha arraigado, sus implicaciones no siempre se han valorado adecuadamente.

Si el ARN no fue el primer material genético, acaso la bioquímica no será capaz de proporcionar pistas sobre el origen de la vida. Presumiblemente, el mundo biológico que fue inmediatamente anterior al mundo del ARN ya tenía la capacidad de sintetizar nucleótidos. Esto debería ayudarnos a formular hipótesis sobre sus características químicas. Sin embargo, si hubiera habido dos o más mundos antes del mundo del ARN, la química original pudo no haber dejado rastros en la bioquímica contemporánea. En tal caso, es improbable que se descubra la química de los orígenes de la vida sin investigar detalladamente toda la química que pudo haber ocurrido en la Tierra primitiva —se relacione o no esa química con la bioquímica—. Esta triste posibilidad no ha impedido la reflexión sobre los sistemas genéticos alternativos.

Los únicos sistemas potencialmente informativos que se han descubierto, aparte de los ácidos nucleicos, se relacionan estrechamente con los ácidos nucleicos.

²⁶ D. Müller *et al.*, "Chimie von α -Aminonitrilen. Aldomerisierung von Glycolaldehyd-Phosphat zu racemischen Hexose-2, 4, 6-Triphosphaten und (in Gegenwart von Formaldehyd) racemischen Pentose-2, 4-Diphosphaten: Rac-Allose-2, 4, 6-Triphosphat und rac-Ribose-2, 4-Diphosphat sind die Reaktionshauptprodukte", *Helvetica Chimica Acta*, 73: 1410-1463, 1990.

²⁷ A. G. Cairns-Smith, *Genetic Takeover and the Mineral Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1982.

²⁸ A. G. Cairns-Smith y C. J. Davis, "The Design of Novel Replicating Polymers", en R. Duncan y M. Weston-Smith (comps.), *Encyclopædia of Ignorance*, Pergamon Press, Nueva York, 1997, pp. 397-403.

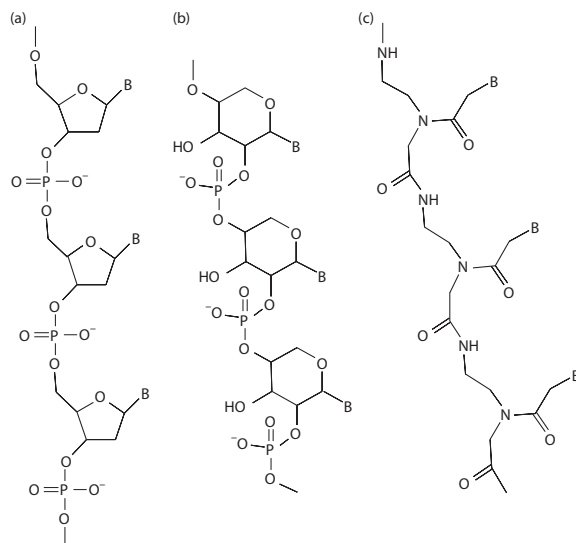


FIGURA VIII.2. *El ADN y los análogos oligonucleótidos potencialmente informativos:*

(a) ADN; (b) análogo piranósico del ARN; (c) ácido nucleico peptídico.

Eschenmoser²⁹ ha emprendido un estudio sistemático de las propiedades de los análogos de ácidos nucleicos, en que la ribosa se reemplaza con otro azúcar o en que la forma furanosa de la ribosa se reemplaza con una forma piranosa (véase la figura VIII.2b). Resulta sorprendente que los polinucleótidos basados en el isómero piranósico de la ribosa (ARN-p) formen una doble hélice Watson-Crick más estable que la del ARN; y también que es menos probable que los ARN-p, en vez de los correspondientes ARN, formen estructuras competitivas de múltiples hebras.³⁰ Además, la hélice gira más gradualmente que la de los ácidos nucleicos estándar, lo cual acaso facilita la separación de las hebras durante la replicación. El piranosil-ARN parece ser una excelente opción como sistema genético; en cierto modo, podría ser mejor que los ácidos nucleicos estándar. Sin embargo, no es probable que la síntesis prebiótica de los nucleótidos piranósicos resulte más fácil que la síntesis de los isómeros normales, aunque Eschenmoser y sus colegas están explorando una vía a través de la ribosa 2,4-difosfato.

El ácido nucleico peptídico (ANP) es otro análogo del ácido nucleico que se ha estudiado ampliamente (figura VIII.2c). Fue sintetizado por Nielsen y sus

²⁹ A. Eschenmoser, "Towards a Chemical Etiology of Nucleic Acid Structure", *Origins of Life and Evolution of the Biospheres*, 27: 535-553, 1997.

³⁰ *Idem*.

colegas³¹ durante la investigación del ARN antisentido. El ANP es un análogo aquiral inactivo del ARN o del ADN; el espinazo de ribosa-fosfato del ácido nucleico se reemplaza con un espinazo ligado por enlaces de amida. El ANP forma una doble hélice muy estable con el ARN o el ADN complementario.³² Nosotros hemos demostrado que la información puede transferirse del ANP al ARN, y viceversa, en reacciones dirigidas por templates³³ y que las quimeras ANP-ADN se forman fácilmente, ya sea en los templates de ADN o en los templates de ANP.³⁴ Por lo tanto, es posible la transición del mundo del ANP al mundo del ARN. No obstante, yo pienso que es improbable que el ANP fuera jamás muy importante en la Tierra primigenia, porque los monómeros de ANP se ciclan al ser activados; esto haría que la formación de oligómeros resultara muy difícil en las condiciones prebióticas.

Los estudios antes descritos sugieren que hay muchas maneras de enlazar entre sí las bases nucleotídicas como cadenas que puedan formar doble hélices Watson-Crick. Acaso se habrá de descubrir una estructura de este tipo que sea fácilmente sintetizable bajo condiciones prebióticas. De ser así, bien podría considerarse como el primerísimo material genético. Sin embargo, todavía hay que explorar otra posibilidad: es posible que el primer material genético no haya utilizado bases nucleotídicas. Dos o más muy sencillas moléculas pudieron haber tenido las propiedades para la formación de las parejas necesarias para constituir un polímero genético; por ejemplo, un aminoácido con activación positiva y otro con activación negativa. Sin embargo, no se sabe que existan estructuras estables de este tipo. El ARN sin duda se adapta a la formación de doble hélice: su restringido espinazo permite la formación simultánea de los pares de bases y del escalonamiento de las bases. Es improbable que unas moléculas mucho más sencillas pudieran sustituir a los nucleótidos. Acaso alguna otra interacción entre las cadenas pudiera estabilizar la doble hélice sin el escalonamiento de las bases; el enlace con una superficie metálica podría proporcionar la regulación necesaria, pero esto todavía se tiene que demostrar. Sin las evidencias experimentales, poco se puede decir que sea útil.

³¹ M. Egholm *et al.*, "Peptide of Nucleic Acids (PNA): Oligonucleotide Analogs with an Achiral Peptide Backbone", *Journal of the American Chemical Society*, 114: 1895-1897, 1992.

³² M. Egholm *et al.*, "PNA Hybridizes to Complementary Oligonucleotides Obeying the Watson-Crick Hydrogen-Bonding Rules", *Nature*, 365 (6446): 566-568, 1993.

³³ J. G. Schmidt, P. E. Nielsen y L. E. Orgel, "Information Transfer from DNA to Peptide Nucleic Acids by Template-Directed Syntheses", *Nucleic Acids Research*, 25: 4792-4796, 1997; J. G. Schmidt, P. E. Nielsen y L. E. Orgel, "Information Transfer from Peptide Nucleic Acids to RNA by Template-Directed Synthesis", *Nucleic Acids Research*, 25: 4797-4802, 1997.

³⁴ M. Koppitz, P. E. Nielsen y L. E. Orgel, "Formation of Oligonucleotide-PNA-chimeras by Template-directed Ligation", *Journal of the American Chemical Society*, 120: 4563-4569, 1998.

La anterior discusión revela un gran abismo entre la complejidad de las moléculas que se pueden sintetizar fácilmente en las simulaciones de la química de la Tierra primigenia y las moléculas que se sabe que potencialmente pueden formar estructuras informativas replicadoras. Por ende, varios autores han propuesto que el metabolismo apareció antes que la genética.³⁵ Ellos piensan que una considerable organización de las secuencias de reacciones puede darse sin un polímero genético y, por lo tanto, que el primer polímero genético probablemente apareció en un medio ambiente químico ya especializado. Puesto que resulta difícil concebir un ciclo químico que produjera nucleótidos β -D, esta teoría sería más aceptable si un sistema genético más sencillo hubiera precedido al ARN.

No hay un acuerdo sobre las posibilidades que pueda tener un metabolismo para desarrollarse independientemente de un material genético. En mi opinión, no hay fundamentos en la química conocida para la idea de que se puedan organizar espontáneamente las secuencias de reacciones largas —y sí hay muchas razones para pensar que no puedan hacerlo—. Es tan severo el problema de que logren alcanzar una especificidad suficiente, ya sea en una solución acuosa o en la superficie de un mineral, que la posibilidad de que puedan completar un ciclo de reacciones tan complejo como el ciclo reverso del ácido cítrico, por ejemplo, es mínima. Lo mismo sucede, creo yo, en los ciclos más sencillos donde interviniere moléculas pequeñas, ciclos que podrían ser significativos en el origen de la vida; y también para los ciclos basados en los péptidos.

CONCLUSIÓN; PERSPECTIVAS

En resumen, hay varias teorías defendibles sobre el origen de la materia orgánica en la Tierra primitiva, pero en ninguna son convincentes las evidencias que la sustentan. De manera parecida, varios planteamientos alternativos podrían explicar la autoorganización de un ente con la capacidad de la autorreplicación surgido de la materia prebiótica, pero los que se han formulado correctamente se basan en hipotéticas síntesis químicas que resultan problemáticas. Regresando a nuestra novela policiaca, debemos concluir que hemos identificado algunos sospechosos importantes y que tenemos una idea del método que pudo utilizar cada

³⁵ S. A. Kauffman, "Autocatalytic Sets of Proteins", *Journal of Theoretical Biology*, 119: 1-24, 1986; G. Wächtershäuser, "Before Enzymes and Templates: Theory of Surface Metabolism", *Microbiological Review*, 52: 452-484, 1988; C. de Duve, *Blueprint for a Cell: The Nature and Origin of Life*, Neil Patterson, Burlington, 1991.

uno. Sin embargo, estamos lejos de saber quién es el culpable. Nuestra única certeza es que habrá una solución racional.

Este resumen ha tenido que ser necesariamente muy selectivo. He pasado por alto aspectos importantes de la química prebiótica (por ejemplo, el origen de la quiralidad, la química orgánica de otros cuerpos del Sistema Solar, aparte de la Tierra, y la formación de las membranas). La mejor fuente para estas cuestiones es la revista *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, particularmente los números que contienen los trabajos que se presentaron en las reuniones de la International Society for the Study of the Origin of Life [Sociedad Internacional para el Estudio del Origen de la Vida].

BIBLIOGRAFÍA

- Blöch, E., M. Keller, G. Wächtershäuser y K. O. Stetter, "Reactions Depending on Iron Sulfite and Linking Geochemistry and Biochemistry", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 89: 8177-8120, 1992.
- Breaker, R. R., "DNA Aptamers and DNA Enzymes", *Current Opinion in Chemical Biology*, 1: 26-31, 1997.
- Butlerow, A., "Formation synthétique d'une substance sucrée", *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, 53: 145-147, 1861.
- , "Bildung einer zuckerartigen Substanz durch Synthese", *Justus Liebigs Annalen der Chemie*, 120: 295-298, 1861.
- Cairns-Smith, A. G., *Genetic Takeover and the Mineral Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
- Cairns-Smith, A. G., y C. J. Davis, "The Design of Novel Replicating Polymers", en R. Duncan y M. Weston-Smith (comps.), *Encyclopædia of Ignorance*, Pergamon Press, Nueva York, 1997, pp. 397-403.
- Chyba, C. F., "The Violent Environment of the Origin of Life: Progress and Uncertainties", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 57: 3351-3358, 1993.
- Chyba, C., y C. Sagan, "Endogenous Production, Exogenous Delivery and Impact-Shock Synthesis of Organic Molecules: An Inventory for the Origins of Life", *Nature*, 355: 125-132, 1992.
- Cronin, J. R., S. Pizzarella y D. P. Cruikshank, "Organic Matter in Carbonaceous Chondrites, Planetary Satellites, Asteroids and Comets", en J. F. Kerridge y M. S. Mathew (comps.), *Meteorites and the Early Solar System*, University of Arizona Press, Tucson, 1988, pp. 819-857.

- Duve, C. de, *Blueprint for a Cell: The Nature and Origin of Life*, Neil Patterson, Burlington, 1991.
- Egholm, M., O. Buchardt, L. Cristensen, C. Behrens, S. M. Freier, D. A. Driver, R. H. Berg, S. K. Kim, B. Norden y P. E. Nielsen, "PNA Hybridizes to Complementary Oligonucleotides Obeying the Watson-Crick Hydrogen-Bonding Rules", *Nature*, 365 (6446): 566-568.
- Egholm, M., O. Buchardt, P. E. Nielsen y R. H. Berg, "Peptide of Nucleic Acids (PNA): Oligonucleotide Analogs with an Achiral Peptide Backbone", *Journal of the American Chemical Society*, 114: 1895-1897, 1992.
- Eklund, E. H., y D. P. Bartell, "RNA-Catalysed RNA Polymerization Using Nucleoside Triphosphates", *Nature*, 382: 373-376, 1996.
- Eklund, E. H., J. W. Szostak y D. P. Bartel, "Structurally Complex and Highly Active RNA Ligases Derived from Random RNA Sequences", *Science*, 269: 364-370, 1995.
- Eschenmoser, A., "Towards a Chemical Etiology of Nucleic Acid Structure", *Origins of Life and Evolution of the Biospheres*, 27: 535-553, 1997.
- Feng, D.-F., G. Cho y R. F. Doolittle, "Determining Divergence Times with a Protein Clock: Update and Reevaluation", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 94: 13028-13033, 1997.
- Ferris, J. P., "Prebiotic Synthesis: Problems and Challenges", *Cold Spring Harbor Symposia on Quantitative Biology*, LII: 29-39, 1987.
- Ferris, J. P., y G. Ertem, "Montmorillonite Catalysis of RNA Oligomer Formation in Aqueous Solution: A Model for the Prebiotic Formation of RNA", *Journal of the American Chemical Society*, 115: 12270-12275, 1993.
- Ferris, J. P., A. Sánchez y L. E. Orgel, "Studies in Prebiotic Synthesis III. Synthesis of Pyrimidines from Cyanoacetylene and Cyanate", *Journal of Molecular Biology*, 33: 693-704, 1968.
- Gesteland, R. F., y J. F. Atkins, *The RNA World: The Nature of Modern RNA Suggests a Prebiotic World*, Cold Spring Harbor Laboratory Press, Nueva York, 1993.
- Hill Jr., A. R., T. Wu y L. E. Orgel, "The Limits of Template-Directed Synthesis with Nucleotide-5'-Phosphoro (2-methyl)imidazolides", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 23: 285-290, 1993.
- Huber, C., y G. Wächtershäuser, "Activated Acetic Acid by Carbon Fixation on (Fe, Ni)S under Primordial Conditions", *Science*, 276: 245-247, 1997.
- Joyce, G. F., G. M. Visser, A. A. van Boeckel, J. H. van Boom, L. E. Orgel y J. van Westrenen, "Chiral Selection in Poly(C)-Directed Synthesis of Oligo (G)", *Nature*, 310: 602-604, 1984.
- Kasting, J. F., "Earth's Early Atmosphere", *Science*, 259: 920-926, 1993.

- Kauffman, S. A., "Autocatalytic Sets of Proteins", *Journal of Theoretical Biology*, 119: 1-24, 1986.
- Kawamura, K., y J. P. Ferris, "Kinetic and Mechanistic Analysis of Dinucleotide and Oligonucleotide Formation from the 5'-Phosphorimidazolidine of Adenosine on NA+-Montmorillonite", *Journal of the American Chemical Society*, 119: 7564-7572, 1994.
- Koppitz, M., P. E. Nielsen y L. E. Orgel, "Formation of Oligonucleotide-PNA-Chimeras by Template-Directed Ligation", *Journal of the American Chemical Society*, 120: 4563-4569, 1998.
- Miller, S. L., "A Production of Amino Acids under Possible Primitive Earth Conditions", *Science*, 117: 528-529, 1953.
- Mojzsis, S. J., G. Arrhenius, K. D. McKeegan, T. M. Harrison, A. P. Nutman y C. R. Friend, "Evidence for Life on Earth before 3800 Million Years Ago", *Nature*, 384: 55-59, 1996.
- Müller, D., S. Pitsch, A. Kittaka, E. Wagner, C. E. Wintner y A. Eschenmoser, "Chemie von α -Aminonitrilen. Aldomerisierung von Glycoaldehyd-phosphat zu racemischen Hexose-2,4,6-Triphosphaten und (in Gegenwart von Formaldehyd) racemischen Pentose-2,4-Diphosphaten: Rac-Allose-2,4,6-Triphosphat und Rac-Ribose-2,4-Diphosphat sind die Reaktionshauptprodukte", *Helvetica Chimica Acta*, 73: 1410-1463, 1990.
- Orgel, L. E., "The Origin of Life on Earth", *Scientific American*, 271: 52-61, 1994.
- Oró, J., "Synthesis of Adenine from Ammonium Cyanide", *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2: 407-412, 1960.
- Pan, T., "Novel and Variant Ribozymes Obtained through in Vitro Selection", *Current Opinion in Chemical Biology*, 1: 17-25, 1997.
- Ring, D., Y. Wolman, N. Friedmann y S. L. Miller, "Prebiotic Synthesis of Hydrophobic and Protein Amino Acids", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 69: 765-768, 1972.
- Schmidt, J. G., P. E. Nielsen y L. E. Orgel, "Information Transfer from DNA to Peptide Nucleic Acids by Template-Directed Syntheses", *Nucleic Acids Research*, 25: 4792-4796, 1997.
- , "Information Transfer from Peptide Nucleic Acids to RNA by Template-Directed Synthesis", *Nucleic Acids Research*, 25: 4797-4802, 1997.
- Schopf, J. W., *The Earth's Earliest Biosphere: Its Origin and Evolution*, Princeton University Press, Princeton, 1993.
- Sleep, N. H., K. J. Zahnle, J. F. Kasting y H. J. Morowitz, "Annihilation of Ecosystems by Large Asteroid Impacts on Early Earth", *Nature*, 342: 139-142, 1989.
- Unrau, P. J., y D. P. Bartel, "RNA-Catalysed Nucleotide Synthesis", *Nature*, 395: 260-263, 1998.

- Wächtershäuser, G., "Before Enzymes and Templates: Theory of Surface Metabolism", *Microbiological Reviews*, 52: 452-484, 1998.
- , "Groundworks for an Evolutionary Biochemistry: The Iron-Sulfur World", *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 58: 85-201, 1992.
- Wolman, Y., H. Haverland y S. L. Miller, "Non Protein Amino Acids from Spark Discharges and their Comparison with the Murchison Meteorite Amino Acids", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 69: 809-811, 1972.

Robert Shapiro

IX. LAS INTERACCIONES DE LAS MOLÉCULAS PEQUEÑAS FUERON CENTRALES EN EL ORIGEN DE LA VIDA*

UN ORIGEN DE LA VIDA MÁS SENCILLO

Los descubrimientos extraordinarios inspiran extraordinarias aserciones. Así, James Watson relató que inmediatamente después de que él y Francis Crick descubrieran la estructura del ADN, Crick “voló al Eagle [un *pub*] para decirle a todos los que pudieran oírlo que nosotros habíamos descubierto el secreto de la vida”. La estructura por ellos descubierta —una elegante doble hélice— era casi merecedora de tanto entusiasmo. Las proporciones de ésta permitían el almacenamiento de la información mediante un lenguaje en que cuatro sustancias químicas, llamadas bases, desempeñaban el mismo papel que las 26 letras del alfabeto inglés.

Por añadidura, la información se almacenaba en dos largas cadenas, cada una de las cuales especificaba el contenido de su pareja. Tal ordenamiento sugería un mecanismo para la reproducción. Cuando las dos hebras de la doble hélice del ADN se separaban, los nuevos componentes de ADN que contenían las bases, o nucleótidos, se alineaban a lo largo de las hebras separadas y se vinculaban. En ese momento, en vez de una doble hélice existían dos, cada cual una réplica de la original.

La estructura Watson-Crick desencadenó una avalancha de descubrimientos sobre la forma en que las células vivientes funcionan hoy en día. Las nuevas revelaciones estimularon multitud de especulaciones sobre el origen de la vida. H. J. Muller, ganador del Premio Nobel, dijo que la materia genética era “materia viviente, la representación actual de la vida primigenia”, la cual Carl Sagan visualizó como “un gen primitivo y desnudo que vive en libertad dentro de una solución de materia orgánica diluida”. (En este contexto, “materia orgánica” especifica los compuestos que contienen átomos de carbono enlazados, tanto los que se presentan en la vida como los que no tienen una función en la vida.) Muchas y diferen-

* Este capítulo apareció originalmente en el número de junio de 2007 de la revista *Scientific American*, pp. 47-53. Reproducido con autorización de Prensa Científica, S. A.

tes definiciones de la vida han sido propuestas. La observación de Muller acaso concuerde con lo que se ha llamado la definición de la NASA: la vida es un sistema químico autosustentable capaz de experimentar la evolución darwiniana.

Richard Dawkins desarrolló esta imagen del ente viviente primigenio en su libro *The Selfish Gene* [*El gen egoísta*]: “En algún momento se formó accidentalmente una molécula particularmente extraordinaria. La llamamos la *Replicadora*. Acaso no fuera la molécula más grande o más compleja que existiera, pero tenía la sorprendente propiedad de ser capaz de crear copias de sí misma”. Cuando Dawkins redactó estas palabras hace 30 años, el ADN era el representante más idóneo de esta función. Posteriormente los investigadores optaron por otras moléculas como posibles representantes de la primigenia molécula que tenía la capacidad de la replicación, pero yo, al igual que otros, pienso que este modelo del origen de la vida basado primordialmente en la replicación tiene defectos fundamentales. Muchos preferimos una idea alternativa que nos parece más plausible.

CUANDO EL ARN DOMINABA EL MUNDO

Pronto aparecieron los cuestionamientos de la teoría del origen de la vida basada primordialmente en el ADN. La replicación del ADN no puede darse sin la asistencia de diversas proteínas —miembros de una familia de moléculas grandes que son químicamente muy diferentes del ADN. Tanto las proteínas como el ADN se integran mediante la vinculación de subunidades en una larga cadena, pero mientras que el ADN se compone de nucleótidos, las proteínas están hechas de aminoácidos. Las proteínas son los obreros calificados de la célula viviente. Las enzimas, la más famosa subespecie de las proteínas, actúan como facilitadores, acelerando los procesos químicos que de otro modo se realizarían con tanta lentitud que serían inútiles para la vida. Las proteínas que hoy utilizan las células se construyen mediante las instrucciones codificadas en el ADN.

La anterior explicación trae a la mente la vieja adivinanza: ¿qué vino antes, la gallina o el huevo? El ADN almacena la receta de la construcción de las proteínas. Pero esa información no puede sacarse o copiarse sin la asistencia de las proteínas. Entonces, ¿cuál fue la molécula grande que apareció primero: las proteínas (la gallina) o el ADN (los huevos)?

Una solución posible apareció cuando un nuevo campeón acaparó la atención: el ácido ribonucleico, ARN. Este versátil tipo de molécula se compone, como el ADN, de esos elementos de construcción conocidos como los nucleótidos, pero

desempeña muchos papeles en nuestras células. Ciertos ácidos ribonucleicos acaorean la información desde el ADN hasta los ribosomas, que son estructuras (constituidas principalmente con otros tipos de ARN) que construyen proteínas. En el desempeño de sus diversas tareas, el ARN puede asumir la forma de una doble hélice parecida a la del ADN, o de una sola hebra doblada, parecida a la de una proteína.

A principios del decenio de 1980 los científicos descubrieron las ribozimas, sustancias compuestas de ARN semejantes a las enzimas. Se presentó entonces una sencilla solución a la adivinanza de la gallina y el huevo: la vida se originó con la aparición de la primera molécula de ARN que fue capaz de copiarse a sí misma. En un artículo fundamental que se publicó en la revista *Nature* en 1986 Walter Gilbert, ganador del Premio Nobel, dijo: “Uno puede considerar la posibilidad de un mundo del ARN que sólo contuviera moléculas de ARN que sirvieran para catalizar la síntesis de sí mismas [...] el primer paso de la evolución entonces ocurriría cuando las moléculas desempeñaran las actividades catalíticas requeridas para ensamblarse a sí mismas con base en una sopa de nucleótidos”. En esta idea, el primer ARN autorreplicable que emergió de la materia no viviente hubo de desempeñar las diversas funciones hoy llevadas a cabo por el ARN, el ADN y las proteínas.

Varias pistas adicionales hoy respaldan la idea de que en la evolución de la vida el ARN apareció antes que las proteínas y el ADN. Por ejemplo, muchas moléculas pequeñas, llamadas cofactores, desempeñan un papel en las reacciones catalizadas por las enzimas. Tales cofactores frecuentemente tienen enlazado un nucleótido de ARN cuya función no es clara. Se considera a este tipo de estructuras como “fósiles moleculares”, reliquias de los tiempos cuando tan sólo el ARN, sin el ADN y sin las proteínas, dominaba el mundo bioquímico.

No obstante, esta pista, junto con otras, sólo respalda la conclusión de que el ARN precedió al ADN y a las proteínas; no proporciona datos sobre el origen de la vida, que pudo haber implicado etapas anteriores al mundo del ARN, en las cuales reinaban otros entes vivientes. Resulta confuso que los investigadores empleen el concepto del “mundo del ARN” para referirse a ambas nociones. Aquí utilizaré “ARN-primordial” para sostener que el ARN estuvo involucrado en el origen de la vida, a fin de diferenciar tal afirmación de la aseveración de que el ARN surgió antes que el ADN y las proteínas.

LA OLLA DE LA SOPA ESTÁ VACÍA

La hipótesis del ARN-primordial enfrenta una pregunta tremendamente retadora: ¿cómo surgió el primer ARN con la capacidad de la autorreplicación? Existen obstáculos enormes contra la idea propuesta por Gilbert de que el ARN se forma en una sopa de nucleótidos no vivientes.

Los elementos constitutivos del ARN, los nucleótidos, son sustancias complejas, en cuanto sustancias orgánicas. Todos contienen un azúcar, un fosfato, y como subunidad una de las cuatro bases nitrogenadas. Así, cada nucleótido de ARN contiene nueve o 10 átomos de carbono, numerosos átomos de nitrógeno y oxígeno, y un grupo de fosfatos; todo se halla conectado, formando una precisa configuración tridimensional. Existen muchas formas alternativas de realizar esas conexiones, dando por resultado miles de posibles nucleótidos que bien podrían vincularse en vez de los nucleótidos normales, pero que no figuran en el ARN. Esta cantidad se ve superada por los cientos o miles y hasta millones de moléculas orgánicas estables de dimensión similar que no son nucleótidos.

La idea de que a pesar de todo se podrían formar nucleótidos adecuados se inspira en un famoso experimento realizado en 1953 por Stanley L. Miller. Éste aplicó una descarga eléctrica en una mezcla de gases simples que por entonces se pensaba que representaban la atmósfera de la Tierra primigenia, y descubrió que se formaron aminoácidos. También se ha comprobado la existencia de aminoácidos en el meteorito Murchison que en 1969 cayó en Australia. La naturaleza se ha mostrado generosa al abastecer la vida con esos singulares elementos constitutivos. Extrapolando estos datos, algunos autores pensaron que *todos* los elementos constitutivos de la vida podrían formarse fácilmente en experimentos similares al de Miller y podrían encontrarse en los meteoritos. Éste no ha sido el caso.

Los aminoácidos que se producen en los experimentos como el de Miller son mucho menos complejos que los nucleótidos. Sus rasgos definitorios son un grupo amino (un nitrógeno y dos hidrógenos) y un grupo de ácido carboxílico (un carbono, dos oxígenos, y un hidrógeno), ambos ligados al mismo carbono. El más sencillo de los 20 aminoácidos utilizados en la construcción de las proteínas naturales contiene sólo dos átomos de carbono. Diecisiete contienen seis o menos de seis carbonos. Los aminoácidos y otras sustancias que aparecieron de manera prominente en el experimento de Miller, contenían dos o tres átomos de carbono. Esto contrasta con el hecho de que no se han registrado nucleótidos de ningún tipo en los experimentos con descargas eléctricas, o en la investigación de los

meteoritos. Aparentemente, la naturaleza inanimada tiende a formar moléculas hechas con menos, en vez de más, átomos de carbono y, por lo tanto, no se muestra a favor de la creación de los nucleótidos necesarios para nuestro tipo de vida.

A fin de poner a salvo el concepto del ARN-primordial de este defecto potencialmente letal, sus partidarios han creado una disciplina, la llamada síntesis prebiótica. Han intentado demostrar que es posible preparar en el laboratorio el ARN y sus componentes mediante una secuencia de reacciones cuidadosamente controladas, bajo las condiciones y con las materias primas que ellos consideran pertinentes.

La versión de este artículo, que se encuentra en la página electrónica de *Scientific American*, examina más detalladamente los defectos de la investigación de la síntesis prebiótica. Tales desperfectos recuerdan la siguiente analogía. Es el caso de un jugador de golf que tras haber jugado con su pelota los 18 hoyos de un campo, supone que en su ausencia la pelota también podría jugar por sí sola todos los hoyos. Él mismo ya había demostrado la posibilidad del suceso; sólo era necesario suponer que cierta combinación de fuerzas naturales (terremotos, vientos, tornados, inundaciones, por ejemplo) pudieran producir con el tiempo el mismo resultado. No es necesario violar una ley física para que ocurra la formación espontánea del ARN, pero las posibilidades de que tal cosa suceda son prácticamente nulas.

Algunos químicos han propuesto que en el “mundo del pre-ARN” primero apareció y gobernó la vida una molécula más sencilla que tenía la capacidad de la replicación y era similar al ARN (figura IX.1). Presumiblemente, esta primera molécula replicadora también tendría las capacidades catalíticas del ARN. Ya que no se ha descubierto todavía en la química moderna ningún vestigio de esta hipotética molécula primigenia replicadora y catalizadora, el ARN tuvo que suplantar en algún momento después de su emergencia estas funciones.

Sin embargo, aun si la naturaleza pudo haber dispuesto una sopa primordial de elementos constitutivos adecuados, ya fueran los nucleótidos o un sustituto más sencillo, su ensamblaje espontáneo para formar una molécula replicadora implica implausibilidades que con mucho superan las relacionadas con la preparación de la sopa. Supongamos que la sopa de elementos constitutivos de alguna manera se pudiera formar, bajo condiciones que favorecieran su vinculación catenaria. Aparecerían junto con estos elementos hordas de unidades defectuosas cuya inclusión en la cadena naciente arruinaría su habilidad para actuar como replicadores. El tipo más sencillo de unidad defectuosa sólo tendría un “brazo” para conectarse a uno de los elementos constitutivos, en vez de los dos que serían necesarios para sustentar el crecimiento de la cadena.

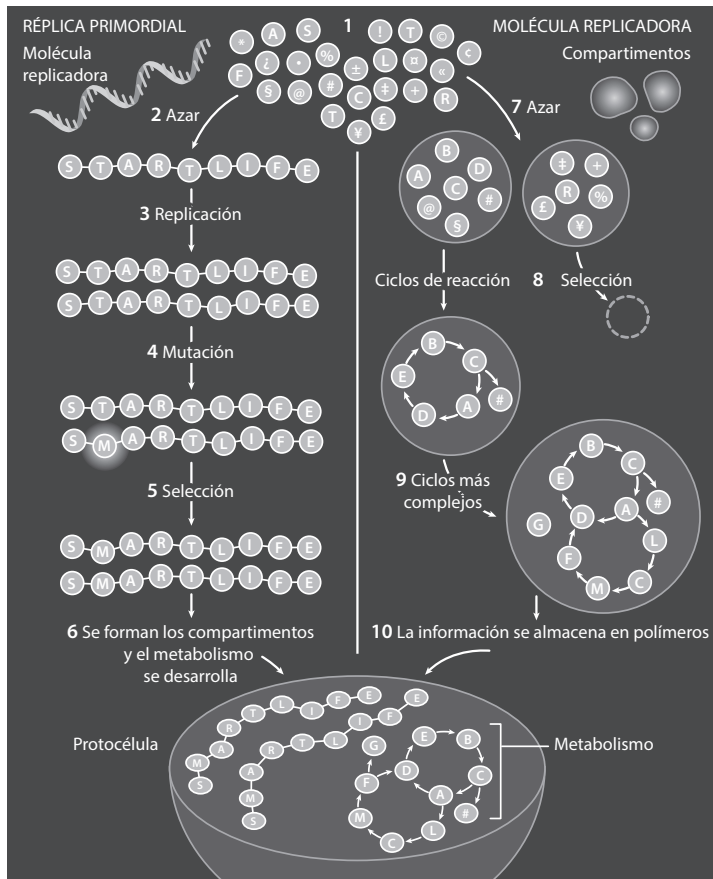


FIGURA IX.1. Replicación vs. metabolismo.

Las teorías del origen de la vida generalmente se dividen en dos campos antagónicos: el de la replicación primordial y el del metabolismo primordial. Ambos modelos deben partir de moléculas formadas por procesos químicos no biológicos, aquí representados por círculos con símbolos (1). En el modelo de la replicación primordial, algunos de estos componentes se ligan entre sí como una cadena, formando aleatoriamente una molécula —acaso algún tipo de ARN— capaz de reproducirse a sí misma (2). La molécula hace muchas copias de sí misma (3), a veces formando versiones mutantes que también tienen la capacidad de la replicación (4). Las moléculas replicadoras mutantes que se adaptan mejor a las condiciones suplantando las versiones anteriores (5). Con el tiempo este proceso evolutivo debe conducir al desarrollo de compartimentos (especie de células) y del metabolismo, en el cual las moléculas más pequeñas utilizan energía para desempeñar procesos útiles (6). El metabolismo al principio se inicia con la formación espontánea de compartimentos (7). Algunos compartimentos contienen mezclas de los componentes iniciales, las cuales experimentan ciclos de reacciones (8) que con el tiempo se hacen más complejos (9). Finalmente, los sistemas tienen que realizar un salto hasta el almacenamiento de la información en los polímeros (10).

Una naturaleza indiferente, teóricamente combinaría de modo aleatorio las unidades, produciendo una inmensa variedad de cadenas cortas en vez de la cadena más larga cuyo espinazo tuviera la uniforme geometría requerida para sustentar las funciones replicadoras y catalíticas. La probabilidad de que este último proceso se lograra es tan mínima, que la eventualidad de que ocurriera en tan sólo una ocasión en cualquier lugar del universo visible podría considerarse como un suceso inusitadamente afortunado.

LA VIDA CON MOLÉCULAS PEQUEÑAS

Christian de Duve, ganador del Premio Nobel, ha exigido “el rechazo de improbabilidades tan inconmensurables que sólo se les puede llamar milagros, fenómenos que están fuera del alcance de la indagación científica”. El ADN, el ARN, las proteínas y otras moléculas grandes complejas entonces se tendrían que descartar como participantes en el origen de la vida. En su lugar, la naturaleza inanimada nos proporciona una variedad de mezclas de moléculas pequeñas con las que podemos trabajar.

Afortunadamente, desde hace décadas ha existido un grupo alternativo de teorías. Estas teorías utilizan una definición termodinámica de la vida, en vez de genética, sobre la base de un planteamiento de Sagan que apareció en la *Enciclopedia británica*: se podría considerar como viviente una región localizada cuyo orden aumentara (cuya entropía disminuyera) a través de ciclos impulsados por un flujo de energía. Este planteamiento se basa en las moléculas pequeñas, arraigándose en las ideas del bioquímico soviético Alexander Oparin. Las propuestas de este tipo sobre el origen de la vida difieren en ciertos detalles específicos; daré aquí una lista de cinco requerimientos comunes (y añadiré algunas ideas más) (figura IX.2).

Es necesaria una demarcación entre la vida y la no vida

La vida se distingue por su gran nivel de organización, pero la segunda ley de la termodinámica exige que el universo se dirija hacia el aumento del desorden o la entropía. Sin embargo, una laguna en la ley permite que la entropía disminuya en un área delimitada, siempre que un aumento mayor ocurra fuera del área. Al multiplicarse y crecer, las células vivientes convierten la energía química o la radiación en calor. El calor liberado hace que aumente la entropía del medio

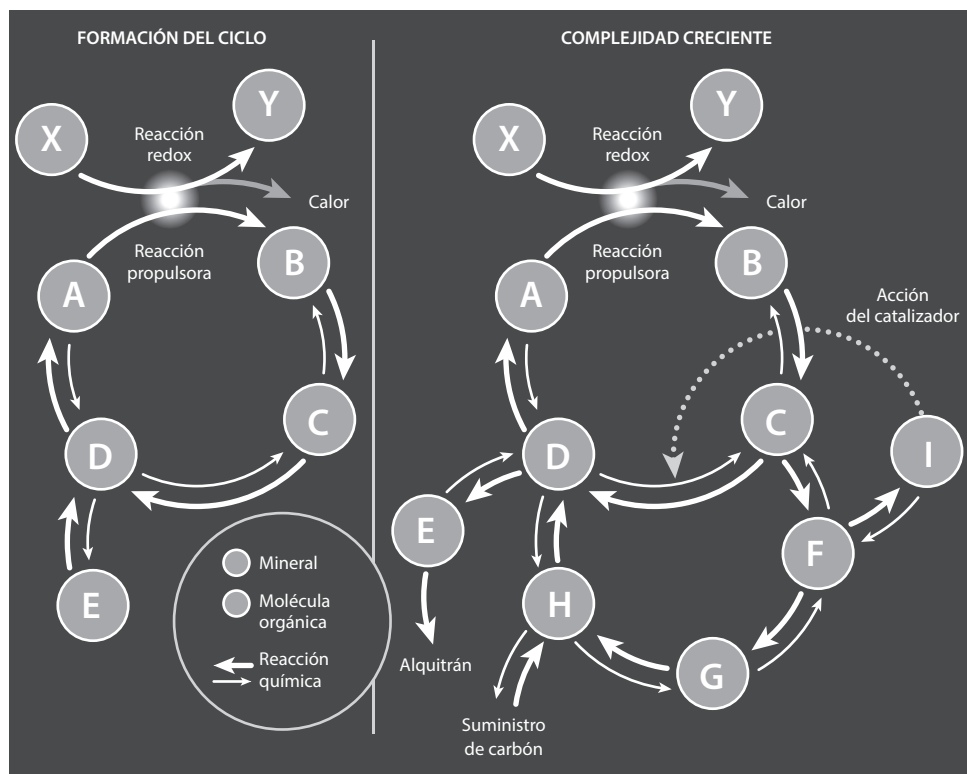


FIGURA IX.2. La evolución de las redes químicas.

La hipótesis del metabolismo primordial requiere la formación de una red de reacciones químicas que aumente en complejidad y se adapte a los cambios del medio ambiente. Formación del ciclo: una fuente de energía (aquí la llamada reacción redox que convierte al mineral X en el mineral Y) se acopla a una reacción que convierte la molécula orgánica A en la molécula orgánica B. Las siguientes reacciones (B a C, C a D...) forman un ciclo de regreso a A. Las reacciones que involucren a las especies moleculares fuera del ciclo (E) procurarán atraer hasta el interior del círculo a estas moléculas. Aumento de la complejidad: si un cambio en las condiciones inhibe una reacción en el ciclo (por ejemplo, C a D), entonces se pueden explorar otras vías. Aquí se ha encontrado una vía de circunvalación, en la cual C se convierte en D mediante las intermediarias F, G y H. Otra solución sería la incorporación en la red de reacciones de un catalizador (I) cuya acción (línea punteada) destraba la transformación de C a D. Para sobrevivir, la red evolutiva debe atraer las sustancias del entorno que contengan carbono más rápidamente de lo que las pierde por la difusión y las reacciones laterales, tales como la formación de alquitranes que se asientan y quedan fuera de la solución.

ambiente, lo cual compensa la disminución de la entropía en el sistema viviente. La demarcación mantiene esta división del mundo; por una parte están los sistemas vivientes, y por la otra el medio ambiente no viviente que los sustenta.

Hoy en día, unas sofisticadas membranas celulares de dos capas, hechas con sustancias químicas clasificadas como lípidos, separan a las células vivientes de su medio ambiente. En los inicios de la vida, algún tipo de condición natural probablemente tuvo la misma función. David W. Deamer, de la Universidad de California, Santa Cruz, ha observado estructuras parecidas a membranas en los meteoritos, lo cual respalda esta idea. También se ha especulado sobre la existencia de demarcaciones naturales no utilizadas por la vida hoy, tales como las membranas de sulfato de hierro, las superficies rocosas (donde las interacciones electrostáticas separan de su medio ambiente a las moléculas seleccionadas), los pequeños charcos y los aerosoles.

*Es necesaria una fuente de energía
para propulsar el proceso organizativo*

Nosotros, para mantenernos, consumimos carbohidratos y grasas, combinándolos con el oxígeno que inhalamos. Los microorganismos son más versátiles y pueden utilizar minerales en lugar de la comida o el oxígeno. En ambos casos, las transformaciones involucradas se denominan reacciones redox. Éstas conllevan la transferencia de electrones desde una sustancia rica en electrones (o reducida) a una pobre en electrones (u oxigenada). Las plantas capturan directamente la energía solar y la adaptan a las funciones de su vida. Las células utilizan otras formas de energía en circunstancias específicas —por ejemplo, cuando hay una diferencia de acidez en ambos lados de la membrana—. La vida en otros lugares del universo podría utilizar aún otras formas de energía, como la radiactividad y los abruptos cambios de temperatura.

*Un mecanismo de acoplamiento debe vincular
la liberación de la energía con el proceso organizativo
que produce y sustenta la vida*

La liberación de la energía no produce necesariamente un resultado útil. Cuando la gasolina se consume dentro de los cilindros de un automóvil, hay una liberación de energía química, pero el vehículo no se moverá a menos que esta energía

se utilice para poner en movimiento sus ruedas. Se requiere una conexión mecánica, o acoplamiento. Todos los días, en nuestras propias células, todos nosotros degradamos varios kilos de un nucleótido llamado ATP. La energía que se libera por esta reacción sirve para propulsar procesos requeridos por nuestra bioquímica que de otra manera se desarrollarían con demasiada lentitud o simplemente no lo harían. La vinculación se logra cuando las reacciones comparten un intermediario común, y el proceso se acelera por la intervención de una enzima. En el planteamiento basado en las moléculas pequeñas, se supone que en la naturaleza existieron reacciones acopladas y catalizadores primitivos que fueron lo suficientemente efectivos como para darle un inicio a la vida.

*Debe formarse una red química que permita
la adaptación y la evolución*

Llegamos ahora al meollo del asunto. Imagínese, por ejemplo, que una reacción redox de un mineral propulse la conversión de una sustancia química orgánica, A, en otra, B, dentro de un compartimento. Yo denomino reacción propulsora a esta transformación clave porque funciona como un motor que moviliza el proceso organizativo. Si B simplemente se reconvierte en A o se escapa del compartimento, no nos encontraríamos en una vía que condujera a una organización acrecentada. En cambio, si una vía química de varios pasos —digamos, B a C a D a A— reconvierte B en A, entonces los pasos en ese proceso circular (o ciclo) serían favorecidos para que continuaran operando, ya que reabastecerían el suministro de A, permitiendo la continuación de la útil liberación de energía mediante la reacción mineral (figura IX.2).

También ocurrirían reacciones ramificadas; por ejemplo, cuando las moléculas pasaran de D a otra sustancia química, E (que se ubica fuera del ciclo ABCD), y viceversa. Ya que el ciclo estaría propulsado, la reacción E-a-D sería favorecida para trasladar sustancias dentro del círculo y maximizar la liberación de energía que acompaña a la reacción propulsora.

El ciclo también podría adaptarse a circunstancias cambiantes. Siendo niño, me fascinaba la manera en que el agua que goteaba de un grifo se hacía un sendero calle abajo hasta llegar a una coladera. Si las hojas secas o la basura bloqueaban su camino, el agua retrocedía hasta encontrar otra vía alrededor del obstáculo. De la misma manera, si un cambio en la acidez o en alguna otra circunstancia ambiental estorbara un paso en la vía B a A, las sustancias retrocederían hasta

encontrar otra ruta. Cambios adicionales de este tipo convertirían el ciclo original en una red. Esta manera de tantear el “terreno” químico también podría poner al descubierto compuestos que pudieran catalizar pasos importantes en el ciclo, incrementando la eficacia con que la red utilizara la fuente de energía.

La red debe crecer y reproducirse

Para sobrevivir y crecer, la red debe obtener sustancias más rápidamente de lo que las pierde. La entropía propicia la difusión de las sustancias de la red en el mundo exterior, fuera del compartimento, propagación que sólo debe darse hasta cierto punto. Algunas reacciones laterales pueden producir gases, que escapan, o formar alquitranes, que se asientan fuera de la solución. Si estos procesos conjuntamente excedieran la velocidad con que la red obtiene sustancias, entonces ésta se extinguiría. El mismo efecto tendría el agotamiento del combustible externo. Podemos imaginar, en la Tierra primigenia, una situación en que muchos inicios de este tipo ocurrieran involucrando muchas reacciones propulsoras alternativas y muchas fuentes de energía externa. Finalmente, uno particularmente resistente se arraigaría y se sustentaría a sí mismo.

Tuvo que desarrollarse con el tiempo un sistema de reproducción. Si nuestra red se hubiera alojado en una membrana lípida, las fuerzas físicas habrían podido dividirla cuando creciera lo suficiente. (Freeman Dyson, del Instituto de estudios Avanzados de Princeton, Nueva Jersey, ha descrito tal sistema como “un mundo de bolsa de basura” que contrasta con “el limpio y bonito escenario” del mundo del ARN.) Un sistema que hubiera existido dentro de un compartimento en una roca, habría podido derramarse hasta compartimentos adjuntos. Cualquiera que fuese el mecanismo, esta dispersión en unidades separadas hubiera protegido al sistema de la extinción total por causa de un suceso destructivo local. Una vez establecidas las unidades independientes, habrían evolucionado en formas diferentes y competido entre sí para obtener materias primas; se habría logrado la transición de la vida que emerge de la materia no viviente mediante la acción de una fuente de energía disponible, a la vida que se adapta a su medio ambiente mediante la evolución darwiniana.

EL CAMBIO DE PARADIGMA

Los sistemas del tipo que he descrito, usualmente se clasifican bajo el membrete de “metabolismo primordial”, lo cual implica que no contienen un mecanismo para la herencia. En otras palabras, no contienen una molécula o estructura obvia que permita que la información se almacene en ellos (su herencia) a fin de duplicarse y transmitirse a sus descendientes. Sin embargo, un conjunto de pequeños ítems contiene la misma información que una lista que describe los ítems. Por ejemplo, mi esposa me da una lista de las cosas que hay que comprar en el supermercado; el conjunto de las cosas que compro en el supermercado y que traigo a casa, contiene la misma información que la lista. Doron Lancet, del Weizmann Institute of Science en Rehovot, Israel, le ha dado el nombre de “genoma composicional” a la herencia almacenada en las moléculas pequeñas, en vez del nombre de una lista, como ADN o ARN.

El planteamiento, basado en las pequeñas moléculas, del origen de la vida, exige ciertas cosas de la naturaleza (un compartimiento, un suministro de energía externo, una reacción propulsora acoplada con ese suministro, una red química que incluye esa reacción y un mecanismo simple para la reproducción). Estos requisitos son de naturaleza general; sin embargo, son inmensamente más probables que las complejas vías de muchos pasos requeridas para formar una molécula con la capacidad de la replicación.

A lo largo de los años, muchas investigaciones teóricas han elaborado planteamientos basados en el metabolismo primordial, pero no los han respaldado con las suficientes evidencias experimentales. Los experimentos que se han publicado usualmente demuestran la posibilidad de ciertos pasos individuales en un ciclo propuesto. La mayor cantidad de nuevos datos acaso proviene de Günter Wächtershäuser y sus colegas de la Universidad Técnica de Múnich. Han demostrado algunos de los pasos de un ciclo que integra la combinación y la separación de aminoácidos en presencia de catalizadores de sulfito metálico. La energética fuerza propulsora de las transformaciones se proporciona por la oxidación del monóxido de carbono que forma dióxido de carbono. Los investigadores aún no han demostrado el funcionamiento de un ciclo completo o su habilidad para sustentarse a sí mismo y experimentar una mayor evolución. Será necesario un experimento que desarrolle estos tres aspectos de manera irrefutable para establecer la validez del planteamiento basado en las pequeñas moléculas.

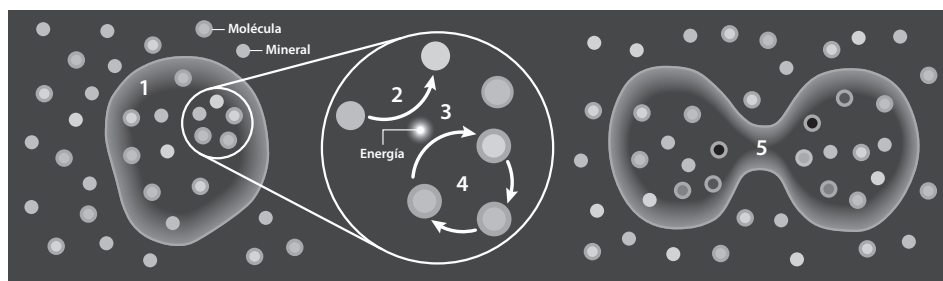


FIGURA IX.3. Cinco requisitos para el origen de la vida basado en el metabolismo primordial. Por lo menos cinco procesos deben tener lugar para que las moléculas pequeñas logren alcanzar una especie de vida —aquí definida como la creación de un orden mayor en regiones localizadas, mediante ciclos químicos propulsados por un flujo de energía—. Primero, algo tiene que crear una demarcación para separar la región viviente del entorno no viviente (1). Se debe disponer de una fuente de energía, aquí representada por un mineral que experimenta una reacción productora de calor (2). La energía liberada debe propulsar una reacción química (3). Una red de reacciones químicas debe formarse, incrementando su complejidad, a fin de permitir la adaptación y la evolución (4). Finalmente, la red de reacciones debe atraer a sí misma sustancias más rápidamente de lo que las pierda, y los compartimentos deben reproducirse (5). No se requiere ninguna molécula para el almacenamiento de la información (tal como el ARN o el ADN); la herencia se almacena en la identidad y la concentración de los componentes de la red.

La principal tarea inicial sería la identificación de las posibles reacciones propulsoras; transformaciones de pequeñas moléculas (A a B en el ejemplo precedente), acopladas con una abundante fuente de energía externa (tal como la oxidación del monóxido de carbono, o un mineral). Una vez que se hubiera identificado una verosímil reacción propulsora, no habría la necesidad de especificar por adelantado el resto del sistema. Los componentes seleccionados (incluida la fuente de energía), además de una mezcla de otras moléculas pequeñas normalmente producidas mediante procesos naturales (y que probablemente abundaron en la Tierra primigenia), se podrían combinar en un recipiente de reacciones adecuado (figura IX.3). Si se estableciera la existencia de una red evolutiva, podríamos esperar que la concentración de las sustancias participantes en la red aumentara y cambiara con el tiempo. Podrían aparecer nuevos catalizadores que incrementaran la velocidad de las reacciones claves, mientras que la cantidad de las sustancias irrelevantes decreciera. El reactor necesitaría un dispositivo de entrada (que permitiera el reabastecimiento de la energía y las materias primas) y

un dispositivo de salida (que permitiera la eliminación de los desperdicios y las sustancias químicas que no fueran parte de la red).

En tales experimentos, las fallas podrían identificarse fácilmente. La energía podría disiparse sin producir cambios significativos en las concentraciones de otras sustancias químicas, o éstas podrían convertirse en un alquitrán, el cual haría que se atascara el aparato. Un experimento exitoso podría demostrar los pasos iniciales en el camino a la vida. No sería necesario que estos pasos duplicaran los que tuvieron lugar en el suelo primigenio. Sería más importante que se demostrara el principio general y se proporcionara para las sucesivas investigaciones. Es posible que haya muchas vías potenciales a la vida, y que su adopción dependa del medio ambiente local.

La comprensión de los pasos iniciales que produjeron la vida no revelaría los sucesos específicos que produjeron los organismos basados en ADN-ARN-proteínas que hoy en día conocemos. Aun así, puesto que sabemos que la evolución no se anticipa a los futuros sucesos, podemos suponer que los nucleótidos aparecieron en el metabolismo para cumplir algún otro propósito, acaso como catalizadores o como contenedores para el almacenamiento de la energía química (el nucleótido ATP sigue cumpliendo con esta función hoy). Algún suceso o circunstancia aleatorios pudieron haber producido la conexión de nucleótidos a fin de formar el ARN. La función más obvia del ARN moderno es la de servir como un elemento estructural que ayuda en la formación de los enlaces entre los aminoácidos en la síntesis de las proteínas. Los primeros ARN pudieron haber servido para el mismo propósito, pero sin una preferencia por aminoácidos específicos. Muchos pasos sucesivos en la evolución habrían de ser necesarios para “inventar” los elaborados mecanismos para la replicación y la síntesis proteínica específica que hoy en día observamos en la vida.

Si el paradigma general de las moléculas pequeñas se confirmara, entonces nuestras ideas respecto al sitio que ocupa la vida en el universo cambiarían. Un inicio altamente improbable de la vida, como el que se basa en ARN primordial, implica un universo en el que estamos solos. Como dice el bioquímico Jacques Monod, “el universo no estaba preñado de vida ni la biosfera de seres humanos. Nuestro número salió en la lotería de Monte Carlo”.

La alternativa de las moléculas pequeñas, en cambio, se corresponde con la perspectiva del biólogo Stuart Kauffman: “Si todo esto es verdad, la vida es muchísimo más probable que lo que habíamos supuesto. El universo no sólo es nuestro hogar, muy posiblemente lo compartimos con compañeros que aún no conocemos”.

Iris Fry

X. ¿SON TAN DIFERENTES LAS DISTINTAS HIPÓTESIS SOBRE LA EMERGENCIA DE LA VIDA?*

INTRODUCCIÓN

El campo científico dedicado al estudio del origen de la vida se caracteriza en alto grado por la controversia. El desacuerdo entre los actuales participantes en la investigación parece ser muy profundo y estar relacionado con los aspectos más básicos de los diversos modelos propuestos. Esto probablemente se debe a la relativa novedad del campo y al hecho de que su naturaleza interdisciplinaria atrae a científicos que utilizan diferentes categorías metodológicas y teóricas, pero sobre todo a la inevitable dimensión especulativa del tema. A pesar de esta pronunciada diversidad científica, un común denominador muy básico enlaza a todos los investigadores de la emergencia de la vida. Este elemento común, para el cual yo acuñaré el concepto de “la tesis de la continuidad”, es la suposición de que no existe un abismo insondable entre la materia inorgánica y los sistemas vivientes, y de que *en las condiciones físicas apropiadas la emergencia de la vida es altamente probable*. La adopción de la “tesis de la continuidad”, una tesis que se corresponde con la dimensión filosófica de la relación entre la vida y la materia, ha convertido en una cuestión legítimamente científica el origen de la vida, y constituye una condición necesaria para cualquier investigación científica en este dominio.

La “tesis” se refleja en los intentos que distintos investigadores han realizado a fin de basar la emergencia de los aspectos biológicos de los sistemas autoorganizados, tanto en los principios físicos universales como en las propiedades fisicoquímicas de estos sistemas.¹ Yo afirmo que la tesis de la continuidad, la cual es una *presuposición filosófica*, no se deriva del ámbito científico, a pesar de que haya

* Este capítulo apareció originalmente en *Biology and Philosophy*, 10 (4): 389-417, 1991. Reproducido con la autorización de Springer+Business Media B. V.

¹ No es sorprendente, como recientemente lo ha comentado Manfred Eigen, que Darwin haya pensado en una especie de “tesis de continuidad”. Aunque él sabía que la cuestión del origen de la vida era irresoluble en su tiempo, sin embargo consideraba, en una carta de 1881 a Nathaniel Wallich, la posibilidad de un “principio de la continuidad” que “hace probable que el principio de la vida [la selección na-

sido fortalecida por sus investigaciones. Es evidente que los datos empíricos, junto con otros factores, contribuyeron al establecimiento histórico de la idea naturalista del mundo, de la cual forma parte la tesis de la continuidad. En esta idea del mundo la “tesis” es hoy un corolario lógico y necesario.

Mi discusión se enfocará en la “tesis de la continuidad”, tal como se ha asumido y aplicado en el contexto evolucionista, tanto en la actualidad como en los últimos decenios; y sólo tocará periféricamente la historia del tema. La cuestión crucial, a saber, cómo explicar, dentro de un solo marco teórico, los objetos físicos relativamente simples y los sistemas vivientes complejos, dio origen a través de los siglos a dos respuestas principales, en realidad las únicas repuestas posibles en un contexto no evolucionista. La “respuesta mecánica”, que aún desconocía la enorme complejidad de la vida, afirmaba que la materia inanimada y la animada son esencialmente la misma, y que por lo tanto para la producción de la última por la primera sólo son necesarios los medios mecánicos.² La respuesta vitalista, que durante muchas eras se traslapó con la posición teológica, veía la vida como una categoría absolutamente distinta. La conexión entre ésta y la materia inorgánica sólo podía lograrse mediante la intervención de algún agente o principio trascendente.³ Respecto al problema del origen de la vida, estas dos respuestas se manifestaban en las diferentes explicaciones de la doctrina de la generación espontánea, y en las controversias en torno a esta cuestión que se iniciaron en los siglos XVII y XVIII.⁴

Alexander Oparin, desde el decenio de 1920 en sus estudios pioneros sobre el origen de la vida, fue uno de los primeros que propuso una tercera alternativa, la cual, basándose en el paradigma evolucionista, rechazaba la tradicional respuesta mecanicista tanto como la vitalista. Oparin aseveró que “el desarrollo de la vida era parte integral del desarrollo general de la materia”,⁵ enfatizando, sin embargo,

tural] con el tiempo se demostrara que es parte, o la consecuencia, de alguna ley general” (véase M. Eigen, *Steps towards Life*, Oxford University Press, Oxford, 1992, p. 17).

² Reflejaba esta posición la que consideraba que toda materia era por igual viviente (S. Toulmin y J. Goodfield, *The Architecture of Matter*, The University of Chicago Press, Chicago, 1982, p. 317). Según esta idea, las categorías del desarrollo orgánico son más fundamentales en la naturaleza que las categorías mecánicas (véase, por ejemplo, J. S. Haldane, *Mechanism, Life and Personality*, John Murray, Londres, 1921).

³ S. Toulmin y J. Goodfield, *op. cit.*

⁴ J. Farley, *The Spontaneous Generation Controversy from Descartes to Oparin*, Baltimore, 1974. La idea de la “generación espontánea” de la vida —la abrupta, inmediata aparición de organismos enteramente formados a partir de la materia inanimada— se justificó, en diferentes periodos, ya sea sobre la base de la acción de principios mecánicos (por ejemplo, los animistas, Descartes), o de la intervención de un espíritu donador de la vida, o de Dios, en la implementación de la forma en la materia basta (por ejemplo, Plotino, Tomás de Aquino). Véase A. I. Oparin, *Genesis and Evolutionary Development of Life*, trad. de E. Maas, Academic Press, Nueva York, 1967, pp. 9-40.

⁵ A. I. Oparin, “Forward”, en S. W. Fox y K. Dose, *Molecular Evolution*, W. H. Freeman, San Francisco, 1972.

los aspectos únicos de la organización de los sistemas biológicos.⁶ Influidos por los trabajos de Oparin, muchos textos teóricos adoptaron la tesis de la continuidad que incorporaba la lógica del paradigma evolucionista, señalando el gradual desarrollo de la organización biológica a través de etapas consecutivas, tanto como la naturaleza determinista del proceso.⁷

Mis objetivos en este capítulo son los siguientes: primero, destacar la existencia de la tesis de la continuidad, cuyos partidarios yo agrupo en “el campo de la ley”; segundo, discutir las ideas expresadas por los oponentes de la tesis dentro de la comunidad científica que integran “el campo del casi milagro”; tercero, señalar la ventaja heurística de la adopción y utilización explícitas de la tesis de la continuidad por los investigadores en el dominio del origen de la vida. Permítanme elaborar lo anterior. El propósito de este capítulo no sólo consiste en destacar la importancia de un principio filosófico unificador que subyace en las controversias entre los partidarios de las diversas teorías del origen de la vida (y es importante esta “unificación” de fondo en las aparentemente irreconciliables diferencias). Podría objetarse que, de hecho, no es necesario discutir la tesis de la continuidad, pues ciertos desarrollos científicos han mostrado su obviedad y por ende su trivialidad. Yo alego que no son pocos los biólogos que aún mantienen la idea de que la emergencia de la vida fue el resultado de un “feliz accidente”. La noción de que la vida surgió tras un suceso altamente improbable, y, de hecho, casi milagroso,⁸ no es para nada obsoleta. El asunto del “azar y la necesidad”, que aún se debate con frecuencia en el campo del origen de la vida y en la bibliografía más generalizada de la evolución,⁹ es muy pertinente en las cuestiones planteadas por la tesis de la continuidad.

⁶ A. I. Oparin, *The Origin of Life*, Macmillan, Nueva York, 1961, p. 8.

⁷ “Determinismo” significa aquí la total determinación de los fenómenos que condujeron a la emergencia de la vida mediante las condiciones fisicoquímicas que prevalecían en el lugar. Así, bajo las mismas condiciones, la emergencia de la vida es reproducible (véase C. de Duve, *Blueprint for a Cell*, Neil Patterson, Burlington, 1991, p. 211, nota 1). Advuértase que aquí discutimos la fase evolucionista en relación con la formación de la vida, y no las etapas subsecuentes de la evolución biológica. El “requerimiento determinista” se corresponde principalmente con la etapa de transición, y por diversos motivos se tuvo que relajar en posteriores etapas evolutivas (véase C. de Duve, *op. cit.*, pp. 211-217; S. J. Gould, *Wonderful Life*, W. W. Norton, Nueva York, 1989, p. 289). [A. L. Lehninger, *Biochemistry*, Wroth, Nueva York, 1979, p. 771; J. Farley, *op. cit.*, p. 183; J. Keosian, “Life’s Beginnings-Origin or Evolution”, *Origins of Life*, 5: 285-293, 1974; M. Eigen, “Self-organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules”, *Naturwissenschaften*, 58: 519, 1971; J. Wicken, *Evolution, Thermodynamics and Information*, Stanford University Press, Nueva York, 1987.]

⁸ J. Monod, *Chance and Necessity*, Collins Publishing, Fontana Books, Glasgow, 1974; E. Mayr, *The Growth of Biological Thought*, Harvard University Press, Cambridge, 1982; F. Crick, *Life Itself*, Simon and Schuster, Nueva York, 1981.

⁹ Para citar unos cuantos ejemplos: B.-O. Küppers, *Information and the Origin of Life*, MIT Press,

Parece trivial señalar que la posición creacionista sobre el origen de la vida es anticientífica. Pero, por otra parte, está lejos de ser trivial señalar la conexión filosófica entre una posición tan explícita y sus homologaciones implícitas dentro de la comunidad científica. Esta conexión, que intentaré ilustrar, tiene dos aspectos importantes. Primero, con base en el análisis histórico y filosófico, se puede mostrar que la hipótesis del “feliz accidente” excluye la posibilidad de la investigación científica de cómo emergió la vida. Segundo, el punto de vista del “casi milagro” se apoya en la tradicional idea mecanicista de la pasividad de la materia y de su incapacidad total para la autoorganización. Así, la concepción creacionista equipara los procesos materiales que produjeron la emergencia de la vida con la “aleatoria barajadura de moléculas”.¹⁰ En cambio, las diversas teorías actuales sobre el origen de la vida traducen la tesis de la continuidad en la forma de sugerencias específicas sobre los mecanismos de la autoorganización. Esto me lleva a mi tercer objetivo. Aunque las diferentes teorías tienen en común la idea de que no se trata de un misterioso abismo, difieren en el énfasis y particularmente en la percepción de la significancia de la tesis de la continuidad. Yo afirmo, basándome en unos cuantos planteamientos que se han propuesto sobre el origen de la vida, que la firme y consciente adopción de la tesis de la continuidad es un incentivo para nuevas investigaciones en este dominio.

Como último comentario introductorio, debo añadir una advertencia general. Mi discusión de ciertos aspectos de los modelos del origen de la vida no discutirá su verosimilitud o su validez, sino más bien las presuposiciones filosóficas que han sido instrumentales en su creación. Tampoco pretendo ofrecer una visión detallada y actual de conjunto, sino más bien indicar las principales tendencias filosóficas. Por lo tanto, será instructivo empezar con la discusión de unas cuantas diferencias significativas entre las consideraciones filosóficas y las consideraciones empíricas.

SOBRE LA “TESIS DE LA CONTINUIDAD” Y VARIOS “PRINCIPIOS DE LA CONTINUIDAD”

Es necesario distinguir entre la “tesis de la continuidad” aquí expuesta y otras referencias a una especie de “principio de la continuidad” en la literatura del origen

Cambridge, 1990; S. J. Gould, *op. cit.*, 1989; C. de Duve, *op. cit.*, 1991; J. Wicken, *op. cit.*, 1987; R. Dawkins, *The Blind Watchmaker*, Penguin, Londres, 1986.

¹⁰ F. Hoyle y C. N. Wickramasinghe, *Evolution from Space*, J. M. Dent, Londres, 1981, p. 3.

de la vida. En una palabra, los diferentes “principios de la continuidad” son las normas metodológicas que ya presuponen la aceptación filosófica de la “tesis de la continuidad”. Yo afirmo que la tesis de la continuidad es una condición epistemológicamente necesaria que posibilita la investigación del origen de la vida. Como tal, conforma una *heurística negativa*, eliminando del dominio de la posible investigación científica en este campo cualquier teoría que no comparta sus supuestos. Sin embargo, también es capaz de actuar como guía positiva de la investigación, como una *heurística positiva*.¹¹ Siendo así, la tesis da origen a diversas aseveraciones metodológicas y empíricas en relación con las configuraciones y los mecanismos específicos de la emergencia de la vida, incluidas diferentes versiones del “principio de la continuidad”.

Ahora he de mencionar brevemente algunos de los “principios de continuidad” que se encuentran en la literatura. En 1968 Leslie Orgel declaró que él se guiaba por un “Principio de la Continuidad que exige que cada etapa de la evolución se desarrolle continuamente a partir de la etapa previa”. Orgel explicitó que lo que tenía en mente era un principio metodológico, cuya necesidad surge, según él, del hecho de que “es muy difícil entender cómo una organización biológica totalmente diferente pudo haber experimentado una transición continua hasta llegar al sistema de ácidos nucleicos y proteínas que conocemos”.¹² Citando la formulación de Orgel del principio de la continuidad, A. M. Weiner y N. Maizels se apoyaron en la misma suposición metodológica al proponer su idea de los “fósiles moleculares”.¹³ Un fósil molecular es cualquier molécula o función molecular que se “congela en el tiempo”, porque cambiar implicaría una cantidad imposiblemente enorme de cambios simultáneos en el sistema. Por lo tanto, Weiner y Maizels concluyen que los fósiles moleculares “nos aportan pistas sobre el origen y la historia de la vida”.¹⁴

Otra expresión de la misma norma metodológica se encuentra en la noción de la “ortogénesis”, originalmente propuesta en 1849 por Marcel Florkin, uno de los pioneros de la bioquímica comparada y la evolución molecular. Christian de Duve se refiere a la cuestión en su *Blueprint for a Cell* [Anteproyecto de una célula], donde basándose en la “ortogénesis bioquímica” propone que los cataliza-

¹¹ Deseo agradecerle a uno de los lectores de la versión anterior de este trabajo la sugerencia de utilizar en el contexto de mi análisis de la tesis de la continuidad los términos de la “heurística positiva y negativa” acuñados por Imre Lakatos.

¹² L. E. Orgel, “Evolution of the Genetic Apparatus”, *Journal of Molecular Biology*, 38: 381-393, 1968.

¹³ A. M. Weiner y N. Maizels, “The Genomic Tag Model for the Origin of Protein Synthesis”, en S. Osawa y T. Honjo (comps.), *Evolution of Life*, Springer, Tokio, pp. 51-65.

¹⁴ *Ibid.*, p. 53.

dores péptidos primitivos fueron los responsables del desarrollo gradual del protometabolismo en una etapa muy primitiva de la biogénesis.¹⁵ Harold Morowitz ha discutido ampliamente el principio de la continuidad, especialmente en su *Beginnings of Cellular Life* [Inicios de la vida celular].¹⁶ En su discusión podemos discernir la conexión, y, sin embargo, las diferencias entre el principio de la continuidad y la “tesis de la continuidad” filosófica. Morowitz hace hincapié en la naturaleza metodológica de “su” principio, el cual afirma que “en cualquier etapa postulada de la biogénesis tiene que haber una vía continua que retroceda hasta el estado prebiótico de la Tierra y que avance hasta los organismos modernos”.¹⁷ Morowitz se apoya positivamente en el principio de la continuidad a fin de profundizar en los procesos prebióticos basados en nuestro conocimiento de las células contemporáneas. Pero además, él utiliza el principio negativamente, en cuanto crítica de otras teorías.

Como es de esperar, todas las diversas versiones del principio de la continuidad aquí enumeradas presuponen incuestionablemente la “tesis de la continuidad”, tal como en este capítulo se ha definido. Sin embargo, lo filosófico y lo metodológico no coinciden completamente. Es el caso, por ejemplo, del desacuerdo entre Morowitz y Cairns-Smith. Basándose en su principio de la continuidad, Morowitz rechaza la teoría de la arcilla de Cairns-Smith y la teoría de la superficie de pirita propuesta por Wächtershäuser. Puesto que no existen en las células contemporáneas vestigios de estructuras de arcilla o de pirita, el introducirlas, según Morowitz, es algo que viola el principio de la continuidad y “complica innecesariamente la teoría del origen de la vida”.¹⁸ Por otra parte, Cairns-Smith, *apegándose a la tesis de la continuidad*, asevera que lo que lo llevó a proponer una configuración sin precedentes basada en la química inorgánica de la arcilla, fue que el abismo entre “la versión más sencilla que se pueda concebir de los organismos como los conocemos, y los componentes que razonablemente pudo haber generado la Tierra [...] es enorme”, y que sin embargo se tendió un puente sobre el abismo gracias a causas naturales.¹⁹

Los diversos principios de la continuidad efectivamente podrían propiciar la investigación experimental de la emergencia de la vida; en cuanto principios de la continuidad, realmente representan la ventaja heurística de la tesis de la conti-

¹⁵ C. de Duve, *op. cit.*, p. 135

¹⁶ H. J. Morowitz, *Beginnings of Cellular Life*, Yale University Press, Haven, 1992.

¹⁷ *Ibid.*, p. 27.

¹⁸ *Ibid.*, pp. 90-91.

¹⁹ A. G. Cairns-Smith, *Seven Clues to the Origin of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985, pp. 4 y 8.

nidad. No obstante, la *decisión* de adoptar la tesis de la continuidad es *filosófica*, no depende del éxito de un programa experimental específico y tampoco se puede revocar por causa de su fracaso.

FORMULACIÓN DE MOROWITZ SOBRE LA TESIS DE LA CONTINUIDAD

Morowitz formula su versión de la “tesis de la continuidad” (sin darle un nombre) presentándola, con razón, como una de las tres posibles respuestas a la pregunta “¿cómo emergió la vida?” La primera posible respuesta, dice Morowitz, es que el origen de la vida es “el resultado de un acto divino que yace más allá de las leyes de la ciencia”. Según la segunda respuesta, el origen de la vida es comprensible en el ámbito de las leyes de la física. No obstante, “puesto que es el resultado de tantos sucesos aleatorios, la naturaleza de la vida es esencialmente única”.²⁰ La tercera respuesta, que se corresponde con la tesis de la continuidad aquí presentada, afirma que “el origen de la vida es un suceso determinista, el resultado de la acción de las leyes de la naturaleza en un sistema fisicoquímico de cierto tipo. Este sistema evoluciona a lo largo del tiempo, se gobierna por principios físicos, y con el tiempo da origen a formas vivientes”. Morowitz señala que mientras que los dos primeros planteamientos yacen fuera de la ciencia experimental, la tercera opción es una condición necesaria para la investigación científica del origen de la vida. Tal investigación, precisa Morowitz, requiere que el suceso bajo investigación sea “ampliamente determinista y al alcance de la física y la química comunes”.²¹

La tercera respuesta, en la forma que le da Morowitz, abarca el punto que según la tesis de la continuidad es el más esencial en el proceso de la emergencia de la vida: *su carácter determinista*. Aunque los detalles de la evolución de los sistemas vivientes a partir de sistemas fisicoquímicos, dice Morowitz, no tienen que ser totalmente deterministas en todos los aspectos, “el comportamiento general procede de manera predecible”.²² Es también importante advertir que la característica esencial de la segunda opción, la respuesta aparentemente englobada por los procesos naturales, es su énfasis en el *carácter aleatorio* de la emergencia de la vida. Esta opción necesariamente nos lleva a concluir que la emergencia de la vida fue un suceso altamente improbable, de hecho, una singularidad. Como se indi-

²⁰ H. J. Morowitz, *op. cit.*, p. 2.

²¹ *Ibid.*, p. 3.

²² *Idem.*

cará más adelante, existe una fuerte conexión filosófica entre las hipótesis aleatorias y las teológicas: ambas ven la emergencia de la vida como una especie de milagro. Cairns-Smith se refiere a esta conexión diciendo que “existe la tentación, en todo caso, de suponer que si el origen de la vida no fue en verdad sobrenatural, a lo menos fue un suceso muy extraordinario, un suceso muy poco probable, un salto estadístico sobre un gran abismo. De este modo es posible aferrarse a un rastro de magia”.²³

LA TEORÍA DE LA PANSPERMIA Y LA TESIS DE LA CONTINUIDAD

Revisando las seis posibles combinaciones de respuestas a las cuestiones de *cómo y dónde emergió la vida*, Morowitz llega a la conclusión de que tan sólo una combinación, la de un suceso determinista en la Tierra, es “del mayor interés desde el punto de vista de la actual ciencia experimental”.²⁴ Al no establecer la distinción entre las consideraciones empíricas y las filosóficas, Morowitz pasa por alto ciertas diferencias importantes. Hoy la mayoría de los investigadores optan por perspectivas terráqueas o extraterráqueas, basándose en argumentos empíricos que nada tienen que ver con su posición respecto a la tesis de la continuidad. Por otra parte, varios científicos que respaldaron las teorías de la panspermia a finales del siglo pasado y principios del presente, presuponían la *eterna existencia de la vida en el cosmos*, y, por lo tanto, rechazaban la tesis de la continuidad (para una exposición exhaustiva de la historia del tema, véase H. Kamminga).²⁵

Debe hacerse la distinción entre *los argumentos empíricos* que se ocupan de la cuestión de la *verdadera probabilidad de las condiciones físicas* apropiadas para la emergencia de la vida en la Tierra o en cualquier otra parte del universo, y *los argumentos filosóficos* que se ocupan de la probabilidad de la *emergencia de la vida, sean cuales fueren las condiciones físicas*. La estructura formal de ambos tipos de argumentos es similar. Sin embargo, mientras que las aseveraciones empíricas descansan en datos astrofísicos y geofísicos, las filosóficas se basan en una concepción apriorística de la naturaleza de la materia y de la vida. Como se señalará posteriormente, la concepción de la materia pasiva y carente de toda posibilidad de autoorganización, lleva a la conclusión de que la probabilidad de la emergencia de la vida es mínima. Respecto a los argumentos empíricos, algunas

²³ A. G. Cairns-Smith, *op. cit.*, p. 2

²⁴ H. J. Morowitz, *op. cit.*, p. 4.

²⁵ H. Kamminga, “Life from Space — A History of Panspermia”, *Vistas in Astronomy*, 267, 67-68, 1982.

personas, basándose en suposiciones y datos empíricos, concluyen que las condiciones biogenéticas adecuadas solo surgieron en la Tierra. Se dice que los requerimientos de la química de carbono restringieron estrictamente tanto el tipo de planeta que pudiera sustentar a la vida, como el medio ambiente donde pudiera tener lugar el primigenio desarrollo químico. Por lo tanto, son muchos los factores críticos que podrían reducir la posibilidad de la existencia de la vida en otros lugares del universo.²⁶

Por otra parte, a partir de nuevas investigaciones, se ha renovado el interés en las hipótesis de la panspermia que cuestionan la probabilidad de que en la Tierra existieran las adecuadas condiciones biogenéticas. Datos recientes indican que la “ventana temporal”, el espacio de tiempo durante el cual la vida pudo formarse en la Tierra, fue mucho más breve de lo que se suponía anteriormente, a lo más cerca de 500 millones de años solamente.²⁷ Mientras que algunos científicos se basan en estos datos para proponer que los procesos de la evolución química y el origen de la vida terráquea ocurrieron muy rápidamente,²⁸ otros rechazan de manera total la posibilidad de un origen extraterráqueo de la vida. Dudan que el modelo estándar de la evolución química que originalmente expusieron Oparin y Haldane sea válido, y también cuestionan la posibilidad de que un intervalo de tiempo tan breve fuera suficiente para la etapa prebiótica. Su conclusión es que por lo menos ciertas etapas del proceso mediante el cual la vida se originó tuvieron lugar en el espacio.²⁹

Es interesante examinar tanto las consideraciones empíricas como las filosóficas en las ideas de Francis Crick sobre la emergencia de la vida. En algunos de sus escritos al respecto, Crick trata la difícil cuestión empírica de cómo pudieron sintetizarse las complejas moléculas orgánicas en la Tierra primitiva, suponiendo que la atmósfera primigenia no fuera tan reductora como se había pensado anteriormente. Así, Crick plantea la posibilidad de que “en los planetas en otros lugares del universo pudieron existir atmósferas más reductoras, y por lo tanto pudo haber una sopa prebiótica más favorable”.³⁰ Sin embargo, al parecer Crick no está dispuesto a considerar la probabilidad de un escenario para la emergencia de la vida incluso en esos lugares donde las condiciones ambientales parecen más pro-

²⁶ R. T. Rood y J. S. Trefil, *Are We Alone?*, Charles Scribner's Sons, Nueva York, 1981.

²⁷ G. F. Joyce, “RNA Evolution and the Origin Life”, *Nature*, 338: 217-224, 1989, en especial, p. 219.

²⁸ *Idem*; H. J. Morowitz, *op. cit.*, p. 32.

²⁹ V. L. Goldanskii y V. V. Kuzmin, “Spontaneous Breaking of Mirror Symmetry in Nature and the Origin of Life”, *Soviet Physics Uspekhi*, 32: 1-29, 1989; J. Gribbin, *In the Beginning*, Little, Brown and Company, Boston, 1993.

³⁰ F. Crick, *Life Itself*, Simon and Schuster, Nueva York, 1981, p. 79.

metedoras. Un hombre honesto, armado con todo el saber de que ahora disponemos, dice Crick, sólo podría afirmar que “en cierto sentido, el origen de la vida parece ser actualmente *casi un milagro*, siendo tantas las condiciones que tendrían que haber existido para que se iniciara”.³¹ La suposición filosófica básica que subyace en la noción del “casi milagro” se patentiza cuando nos enteramos que para Crick la vida fue “un feliz accidente” que sólo pudo ocurrir gracias a la sucesión de millones de años.³²

Primero con Orgel en 1973, y luego en 1981 en su libro *Life Itself* [La vida misma], Crick expuso su teoría sobre la emergencia de la vida, la “panspermia dirigida”, según la cual la vida, en la forma de bacterias anaerobias, habría sido enviada a la Tierra en una nave espacial por una civilización avanzada, justo en el momento en que las condiciones para la vida en nuestro planeta fueron propicias.³³ La hipótesis de la panspermia dirigida supuestamente pretendía enfocar la atención de la comunidad científica en las enormes dificultades a que se enfrentaba cualquier perspectiva convencional sobre la emergencia de la vida. Sin embargo, en conjunción con la idea de que el origen de la vida había sido un suceso extraordinario, parecería que eso de que las bacterias habrían sido enviadas a la Tierra en una nave espacial no tripulada realmente se contagia del “rastro de magia” que menciona Cairns-Smith. La teoría de la panspermia de Crick es definitivamente “antiexperimental”, para utilizar el término de Morowitz. No obstante, desde una perspectiva filosófica, su principal inconveniente no es su dimensión panspérmica sino más bien su “carácter aleatorio”, y, por lo tanto, su incapacidad para considerar científicamente la cuestión de cómo emergió la organización biológica. Es obvio que remitir la cuestión a otro planeta no resuelve el problema, pues éste no se podrá solucionar mientras se siga considerando la posibilidad del “feliz accidente”.

EL “CAMPO DEL CASI MILAGRO”

La exposición de los argumentos del rival filosófico de la tesis de la continuidad nos ayudará a enfocar nuestra atención en los temas más relevantes que en la controversia se involucran. Mientras que la tesis de la continuidad asume la probable y gradual emergencia de una organización biológica que avanzó paso a paso, el “campo del casi milagro” ve en la emergencia de tal organización un ver-

³¹ *Ibid.*, p. 88. Las cursivas son mías.

³² *Ibid.*, p. 39.

³³ F. Crick y L. E. Orgel, “Directed Panspermia”, *Icarus*, 19: 341-346, 1973; F. Crick, *op. cit.*, 1981.

dadero enigma. Aquí estamos ante “un verdadero enigma”, más que un “problema”, dice Jacques Monod,³⁴ uno de los representantes más expresivos de esta posición. La suposición que une a Monod y a otros miembros del campo del milagro es que el “mecanismo” responsable de la emergencia de un sistema autoorganizado es, de hecho, *la asociación aleatoria de sus constituyentes*. El enigma surge, como lo mostraremos en breve, porque la probabilidad de esta asociación aleatoria es virtualmente nula. La “hipótesis del azar” de Monod se aplica desde la formación de las macromoléculas que integran la célula viviente. La primera secuencia de aminoácidos en la Tierra, según Monod, fue el resultado de un proceso puramente aleatorio.³⁵ Monod llega a esta conclusión basándose en el examen de los aminoácidos en las proteínas existentes (y por implicación, en las secuencias de nucleótidos en los genes que codifican estas proteínas).

Las secuencias son totalmente aleatorias, en el sentido de que “incluso conociendo el orden exacto de 199 residuos en una proteína que contiene 200, sería imposible formular cualquier regla, teórica o empírica, que nos permita predecir la naturaleza de un residuo que aún no ha sido verificado por el análisis”.³⁶ Las secuencias de aminoácidos que existen en las proteínas actuales supuestamente reflejan la formación original de la primera proteína en la Tierra. La ley aleatoria del ensamblaje significa, según Monod, que no hubo restricción alguna de tipo fisicoquímico que dirigiera la formación de la primera proteína; “ningún tipo de regularidad, aspecto especial, o características restrictivas”.³⁷ Así, “aleatoria”, en el sentido que aquí tiene, significa, primero, la *no instruida* (no informada) formación de las primeras proteínas y, segundo, “la igualdad de oportunidades para todos los aminoácidos que participaron en la síntesis”.³⁸ Monod enfatiza, además de su concepción de la “ruleta molecular”, que cada secuencia específica se reproduce en cada organismo mediante un mecanismo extremadamente preciso que garantiza la invariabilidad de la estructura, y sobre la base de esta invariabilidad, en cada organismo surge, mediante la traducción de la estructura lineal de las proteínas en “interacciones teleonómicas de la estructura globular”, el orden y la funcionalidad que caracterizan el sistema viviente. Por lo tanto, Monod con-

³⁴ J. Monod, *Chance and Necessity*, Collins Publishing, Fontana Books, 1974, p. 135.

³⁵ *Ibid.*, p. 96.

³⁶ *Idem.*

³⁷ *Idem.*

³⁸ Como se mostrará después, el término de la “aleatoriedad” que emplea Christian de Duve, por ejemplo, en el contexto de la emergencia de la vida, no es equivalente a la *aleatoriedad estadística*, sino más bien a procesos estrictamente deterministas influidos por *factores cinéticos y estéricos* (C. de Duve, *op. cit.*, p. 187).

cluye que “un proceso totalmente ciego puede por definición conducir a cualquier cosa”.³⁹

Monod no se ocupa (injustificadamente, como veremos) de la cuestión de la formación aleatoria prebiótica de las macromoléculas —las proteínas y los ácidos nucleicos—. Le interesa sobremanera el auténtico enigma de la emergencia de una célula primitiva —de la vinculación primitiva entre las proteínas y los ácidos nucleicos—. Él acepta que la probabilidad apriorística de la formación *aleatoria* de tal sistema (siendo la formación aleatoria el único proceso físico factible que él está dispuesto a considerar) fue “virtualmente nula”.⁴⁰ Sin embargo, no sólo es la probabilidad de la emergencia aleatoria de un organismo unicelular comparable, como dijo apropiadamente Fred Hoyle, con el hecho de que un tornado que pasara por encima de un depósito de vehículos destrozados pudiera ensamblar de esta manera un flamante aeroplano 747, sino que incluso la formación de una macromolécula en particular plantea un profundo problema. La hipótesis de que un primitivo polipéptido o polinucleótido haya tenido un origen “aleatorio” supone que todas las posibles secuencias alternativas serían físicamente equivalentes.

El recíproco del número de todas las posibles combinaciones muestra la probabilidad de la aparición de una secuencia específica. Los cálculos en el caso de los polipéptidos y de los polinucleótidos prueban que el número de variantes posibles supera nuestra comprensión. En el caso de un polímero que se corresponda con un solo gen que contenga 1 000 nucleótidos, el número de variantes aleatorias posibles es de 10 602.⁴¹ La construcción aleatoria de la más pequeña molécula proteínica catalíticamente activa que consistiera en por lo menos 100 residuos de aminoácidos, involucraría más de 10 130 variantes.⁴² Estas cifras muestran que la formación aleatoria de un polímero específico se sitúa más allá de toda probabilidad. Tales datos han conducido a los investigadores en el campo del origen de la vida a sugerir alternativas, que más adelante discutiremos, a la “formación aleatoria” de las macromoléculas en las condiciones prebióticas. En cuanto al enigma de Monod, parecería que toda la materia del universo no sería suficiente para el propósito de la construcción aleatoria del organismo más primitivo (véase Eigen,⁴³ para unos cálculos al respecto).

³⁹ J. Monod, *op. cit.*, p. 96.

⁴⁰ *Ibid.*, p. 136.

⁴¹ M. Eigen, *Steps towards Life*, *op. cit.*, p.10.

⁴² B.-O. Küppers, *Information and the Origin of Life*, MIT Press, Cambridge, 1990, p. 60.

⁴³ M. Eigen, “Viral Quasispecies”, *Scientific American*, 269: 42-49, 1993.

Sin embargo, los organismos sí existen en la Tierra. Al no querer considerar otra opción física que no sea el azar, Monod por lo tanto queda ante un verdadero enigma. De acuerdo con sus suposiciones, el proceso entero de la evolución es una especie de lotería. Tuvimos la fortuna, dice, de que “nuestro número saliera en un juego de Monte Carlo”.⁴⁴ Sin embargo, sobre la base de la probabilidad apriorística “virtualmente nula” de la emergencia de la vida, nos encontramos, según Monod, frente a un suceso único e irrepetible. No podemos excluir la posibilidad de que “el suceso decisivo ocurrió *tan sólo una vez*”.⁴⁵

Debe aclararse la influencia directa de esta conclusión en la posibilidad de la investigación científica del origen de la vida. El mismo Monod admitía cuán desagradable le resultaba su conclusión relativa al “casino”, ya que él aceptaba que “la ciencia no puede decir ni puede hacer nada a partir de un suceso único. Sólo puede considerar los sucesos que forman una categoría y cuya probabilidad *a priori*, a pesar de lo leve que pueda ser, es definitiva”.⁴⁶ Karl Popper, puesto que está de acuerdo con Monod en que la vida emergió de la materia inanimada gracias a una combinación extremadamente improbable de circunstancias aleatorias, ha tenido que admitir que el origen de la vida se ha convertido en “una barrera impenetrable para la ciencia y un residuo en todos los intentos por reducir la biología a la química y la física”.⁴⁷ El último punto planteado por Popper —la posibilidad de la reducción de la biología a la fisicoquímica— es en extremo relevante para nuestra discusión. El examen de algunos de los planteamientos de la “probabilidad virtualmente nula” revela la preocupación con la cuestión de si hay una continuidad entre la vida y la materia inanimada, y con la cuestión de la autonomía de la biología.

Uno de los ejemplos más notables es el planteamiento de Ernst Mayr, el famoso evolucionista, quien es uno de los partidarios del principio de la “autonomía de la biología”.⁴⁸ La distinción que él hace entre los sistemas físicos y los biológicos, y por ende entre la práctica de la biología y la de las ciencias físicas, así como

⁴⁴ J. Monod, *op. cit.*, p. 137. Monod ve la “imagen de la lotería” como una respuesta a las ideologías, especialmente el materialismo dialéctico, que pretenden fundarse en la ciencia pero que de hecho dependen de la “proyección animista”. El punto de vista alternativo a la idea de que la evolución de la biosfera es parte de la evolución cósmica, la cual culmina en el hombre, dice Monod, consiste en representar la evolución como un proceso básicamente aleatorio (*op. cit.*, pp. 39-40).

⁴⁵ J. Monod, *op. cit.*, p. 136.

⁴⁶ *Idem*.

⁴⁷ K. Popper, “Scientific Reduction and the Essential Incompleteness of All Science”, en F. J. Ayala y T. Dobzhansky (comps.), *Studies in the Philosophy of Biology. Reduction and Related Problems*, University of California Press, Berkeley, 1974, p. 270; K. Popper, *The Open Universe: An Argument for Indeterminism*, Rowman and Littlefield, Totowa, 1982, p. 148.

⁴⁸ E. Mayr, *The Growth of Biological Thought*, Harvard University Press, Cambridge, 1982.

su insistencia en la legitimidad científica de la forma en que la biología practica la ciencia, están totalmente justificadas. Sin embargo, Mayr se equivoca respecto a la noción de la “autonomía de la biología” cuando asevera que “el entendimiento real de la *casi imposibilidad* de un origen de la vida nos hace entender cuán improbable fue este suceso”.⁴⁹ Tales afirmaciones de hecho levantan una barrera entre el mundo físico y la emergencia de la organización biológica.

La asociación entre las nociones de que el tema de la biología es la “unidad viviente entera”, y de que hay una división entre la física y la biología, tiende a aparecer en las discusiones sobre la improbabilidad del origen de la vida.⁵⁰ Las opiniones de esta especie crean la impresión de que la distinción entre el “campo de la ley” y el “campo del casi milagro” es, de hecho, la distinción entre los “reduccionistas” y los “holistas” que insisten en ver el organismo como una “unidad viviente entera”. Fortalecen esta impresión no sólo los “autonomistas” sino algunos de sus oponentes. Según Manfred Eigen, las dos opciones filosóficas respecto a la emergencia de la información biológica son la reducción y la suposición de la *vis vitalis*.⁵¹ Sin embargo, al mismo tiempo, Eigen afirma que la información genética representa una cualidad que “con mucho trasciende la química”.⁵² Es claro que se necesita una definición más rigurosa de la “reducción”.

El marco de este capítulo no me permite abordar una discusión seria del intrincado tema del reduccionismo. El punto que quiero señalar aquí, para decirlo con brevedad, es que si bien los sistemas vivos, cuya estructura y función se basan en la información, manifiestan aspectos nuevos que no se hallan en los sistemas no organizados, su emergencia y sus propiedades se pueden explicar a partir de principios físicos. Por lo tanto, creo que es posible trascender la dicotomía entre el “reduccionismo” y las actitudes “organimistas”. La afirmación de que es posible ofrecer una evaluación científica de carácter organimista de la evolución de la vida, que al mismo tiempo se base en principios físicos universales, es uno de los temas medulares del nuevo paradigma evolucionista termodinámico (véase, por ejemplo, Weber y sus colegas).⁵³

La cuestión filosófica básica aquí es la que ya planteó Kant: es posible explicar, en términos materialistas causales, la producción de un conjunto organizado a partir de sus partes, tomando en cuenta que en un conjunto organizado las

⁴⁹ *Ibid.*, p. 584.

⁵⁰ Véase P. T. Mora, “The Folly of Probability”, en S. W. Fox (comp.), *The Origin of Prebiological Systems and of their Molecular Matrices*, Academic Press, Nueva York, 1965, pp. 39-52.

⁵¹ *Ibid.*, p. 122.

⁵² *Ibid.*, p. 124.

⁵³ B. H. Weber et al., *Entropy, Information, and Evolution*, MIT Press, Cambridge, 1988.

partes y el conjunto son recíprocamente dependientes. El hecho de que éste sea en efecto el problema se vuelve evidente cuando la noción básica que Kant tenía del organismo como un círculo vicioso —“la causa y efecto de sí mismo”— se compara con el origen real de la perplejidad y la desesperanza de Monod y de Mayr: la interdependencia circular de las proteínas y los ácidos nucleicos en el organismo.⁵⁴ Según Kant, las explicaciones mecanicistas, materialistas, sólo pueden revelar la producción de un “agregado a partir de sus partes individuales”. Nuestra razón discursiva sólo puede entender la formación de un conjunto integrado como el resultado de su diseño externo.⁵⁵ Esto plantea un dilema difícil respecto a la organización biológica, en que evidentemente cada parte y cada proceso sólo tienen sentido en relación con el conjunto funcional. Sin embargo, a diferencia de un artefacto diseñado, las diferentes partes de un organismo al parecer se producen entre sí de acuerdo con un “plan de diseño interno”.⁵⁶ Por ende, Kant concluye que, si bien obviamente podemos explicar la producción de artefactos, no podemos dar una explicación causal del origen de la organización biológica.⁵⁷

La anterior conclusión no sólo se basa en el concepto que Kant tenía de la estructura de nuestro entendimiento. Lo que es muy relevante para nuestras ideas actuales es su noción de “la materia como algo básicamente inerte, como algo que sería por definición no viviente”.⁵⁸ En este concepto, las estructuras se pueden formar mediante asociaciones mecánicas, mientras que el concepto de los principios físicos de la autoorganización, que involucra una evaluación diferente de la relación entre el conjunto y las partes, es una contradicción de términos. Es por esta razón que la posibilidad misma de la generación espontánea de la vida a partir de la materia inorgánica a Kant le parece absurda.⁵⁹ (Por su parte, Monod y Mayr se preguntan cómo y cuándo se cerró el círculo de la proteína y los ácidos nucleicos, evaluando la probabilidad de este suceso como “virtualmente nula”.) En virtud de estas consideraciones, Kant plantea el siguiente enigma filosófico: ¿cómo llevar a cabo una ciencia de la biología aceptando que la organización no puede formarse sin una organización anterior? A diferencia de la física, la ciencia

⁵⁴ J. Monod, *op. cit.*, p. 153; E. Mayr, *The Growth of Biological Thought*, *op. cit.*, p. 583.

⁵⁵ I. Kant, *Critique of Judgment*, trad. de W. S. Pluhar, Hackett, Indianápolis, 1987, pp. 288-294.

⁵⁶ *Ibid.*, p. 235.

⁵⁷ La solución crítica kantiana de la difícil cuestión de la conformación original de la organización biológica es que tenemos que ver el organismo *como si (als ob)* estuviera diseñado externamente (*op. cit.*, pp. 280-283).

⁵⁸ *Ibid.*, p. 276.

⁵⁹ *Ibid.*, p. 311.

de los organismos tiene límites, dice Kant. Tiene que asumir la organización original como algo dado, y realizar procedimientos científicos y mecanicistas a partir de este punto de partida.⁶⁰

La evaluación filosófica kantiana del estatus de la organización biológica revela la conexión entre su afirmación de la autonomía de la biología y su rechazo o relegación del estudio científico de la emergencia de la organización. Kant declaró categóricamente que jamás aparecería otro Newton que pudiera explicar con base en leyes naturales la creación de “una simple hoja de pasto”.⁶¹ A los biólogos y químicos que hoy afirman que el origen de la vida raya en el milagro probablemente no les gustaría esta profecía. No obstante, en realidad ellos relegan el estudio científico del origen de la organización biológica y crean una barrera entre la evolución biológica y las etapas precedentes de la evolución, así como entre la física y la biología.

La posición de Monod, Mayr y otros que asumen que la vida tuvo su origen en un “feliz accidente”,⁶² implica una seria opción filosófica. Esto se patentiza en el siguiente argumento de Christian de Duve. La respuesta *a priori* de la cuestión del origen de la vida, dice él, es que “*a menos que uno adopte una perspectiva creacionista [...] la vida se originó a través de la sucesión de un número enorme de pequeños pasos, de los cuales casi todos, dadas las condiciones en esos tiempos, tenían una muy alta probabilidad de suceder*”. Esta suposición, añade, simplemente *tiene que plantearse* porque *la alternativa equivale a un milagro* que yace fuera del ámbito de la indagación científica.⁶³ Aquí encontramos la *resolución* explícita de adoptar la tesis de la continuidad a fin de poder *elegir* el camino científico. “Ver que era muy probable, si no obligado, que cada paso sucediera en las condiciones prevalecientes, se sigue del hecho de que el número de pasos individuales debió de haber sido muy grande. Dejemos que la probabilidad de cada paso sea incluso moderadamente baja —digamos 50%— y la probabilidad conjunta, producto de las probabilidades individuales, pronto alcanza niveles que rayan en lo milagroso (10³⁰⁰ en relación con sólo unos 1 000 pasos).”⁶⁴

Que la opción filosófica sea efectivamente entre el punto de vista de la ciencia

⁶⁰ *Idem.* Es por este motivo que Kant alaba a Johann Friedrich Blumenbach, el biólogo alemán, conocido por sus investigaciones embriológicas (y por sus trabajos antropológicos), quien por una parte basaba sus explicaciones embriológicas en la existencia original de la “materia organizada”, y por la otra, “le otorgaba una participación inconfundible al mecanismo natural” (*op. cit.*, p. 311).

⁶¹ *Op. cit.*, p. 282.

⁶² F. Crick, *Life Itself*, *op. cit.*, 1981.

⁶³ C. de Duve, *op. cit.*, p. 112. Las cursivas son mías.

⁶⁴ *Idem.*

natural y el punto de vista creacionista se patentiza cuando el argumento de la “probabilidad virtualmente nula” se lleva a su conclusión lógica, como lo han hecho los astrónomos Fred Hoyle y Chandra Wickramasinghe.⁶⁵ Tanto Monod como Hoyle identifican la producción de la vida mediante causas naturales con una serie de sucesos aleatorios. Según Monod, ya que *a)* la vida se originó por causas naturales, *b)* causas naturales en este caso significa “ninguna regularidad, aspecto especial, o característica restrictiva” en el ensamblaje aleatorio de las moléculas (ningún principio físico de autoorganización), y *c)* la probabilidad de que un encuentro fortuito produjera un resultado tan enormemente complejo es virtualmente nula. La inevitable conclusión de Monod es que la ciencia está ante un enigma que no puede resolver.

Los razonamientos de Hoyle se inician con la misma suposición, pero siguen una vía diferente. Ya que *a)* la vida que surge de causas naturales no es otra cosa que “la barajadura aleatoria de moléculas orgánicas simples”, y que *b)* la probabilidad de que los sistemas bioquímicos se conformen así es “excesivamente diminuta, hasta el punto donde no es sensiblemente diferente del cero”,⁶⁶ Hoyle y Wickramasinghe rechazan la opción aleatoria y, en consecuencia, la vía de las causas naturales totalmente, optando por la introducción del propósito en la naturaleza. Basándose en sus cálculos, ellos dicen que la barajadura aleatoria de aminoácidos tendría una probabilidad tan baja como uno en 1 040 000 de producir las enzimas originales, y por ende, “cualquier teoría con una probabilidad de ser correcta que sea mayor que uno en 10^{40000} , debe considerarse superior a la barajadura aleatoria. Nosotros pensamos que la teoría de que la vida fue ensamblada por una inteligencia tiene una probabilidad muy superior a uno en 10^{40000} de ser la explicación correcta”.⁶⁷

Por lo tanto, Hoyle más que nadie se opone al “principio de la objetividad” de Monod, el cual sería “la denegación sistemática o axiomática de que el saber científico puede adquirirse con base en teorías que involucran, de manera explícita o no, un principio teleológico”.⁶⁸ Nada podría parecerle más repugnante a Ernst Mayr, quien vehementemente niega toda asociación de la teleología con el proceso de la evolución,⁶⁹ que la “escandalosa noción” que Hoyle tiene de la intencionalidad.

⁶⁵ F. Hoyle y N. C. Wickramasinghe, *Evolution from Space*, Dent y Sons, Londres, 1981.

⁶⁶ *Ibid.*, pp. 2-3.

⁶⁷ *Op. cit.*, pp. 129-130; véase también F. Hoyle y N. C. Wickramasinghe, *Our Place in the Cosmos*, J. M. Dent, Londres, 1993, p. 2.

⁶⁸ J. Monod, *op. cit.*, p. 357.

⁶⁹ E. Mayr, “Teleological and Teleonomic, a New Analysis”, *Boston Studies in the Philosophy of Science*, 14: 91-117, 1974.

Sin embargo, las ideas poseen su propia, y a veces independiente, lógica. Considerar, como Monod y Mayr, que la aparición física de un ente viviente primigenio es altamente improbable (como Crick, quien elude el problema del origen de la organización mediante su hipótesis de la “panspermia dirigida”), equivale a cuestionar la capacidad de los principios físicos de la autoorganización para producir la vida. Esto le deja la puerta abierta a la noción teleológica de Hoyle.

Como ya lo indicó Kant, al explicar los fenómenos naturales sometemos la contingencia al dominio de una ley. Kant dice que cuando carecemos de las adecuadas leyes mecanicistas, utilizamos explicaciones teleológicas a fin de legalizar la contingencia.⁷⁰ Así, no hay una genuina dicotomía entre la intencionalidad, o alguna noción de la predestinación en la evolución, y la opción del azar o de la “lotería” de Monod. Estos dos cuernos del dilema defectuoso —el azar y el *télos*— convergen filosóficamente. Además, ambos implican el fin de la investigación científica. Mi análisis hasta este punto corrobora la afirmación de que la *dicotomía genuina* se encuentra entre *la tesis de la continuidad*, según la cual la vida surgió de la materia inanimada mediante probables mecanismos de autoorganización, y *la tesis del “casi milagro”*, que considera que el origen de la vida fue un suceso altamente improbable.

EL “CAMPO DE LA LEY”

Hasta aquí la discusión ha enfocado la cuestión de si el origen de la vida se hubo de basar en sucesos aleatorios. Nuestro análisis ha señalado las diferentes posiciones filosóficas en torno a este punto focal. Ha indicado que por la enorme complejidad del sistema más primitivo que se considera como viviente, la hipótesis del azar equivale a la “hipótesis de la improbabilidad”. La actual indagación experimental y teórica es una alternativa de tal posición. El espíritu filosófico que subyace en esta alternativa está bien representada en las palabras de J. D. Bernal, quien en respuesta a las aserciones del campo del milagro ha dicho: “La cuestión de si la vida pudo originarse gracias a la aparición aleatoria de átomos, claramente conlleva una respuesta negativa. Esta respuesta, combinada con el conocimiento de que la vida realmente existe aquí, nos lleva a la conclusión de que ciertas secuencias diferentes de los sucesos aleatorios debieron resultar en la aparición de la vida”.⁷¹ Hablando en general, se podría decir que las diferencias entre las

⁷⁰ I. Kant, *op. cit.*, p. 287.

⁷¹ J. D. Bernal, “Discussion”, en S. W. Fox (comp.), *The Origin of Prebiological Systems and their Molecular Matrices*, Academic Press, Nueva York, 1965, pp. 65-88.

diversas teorías actuales en el campo del origen de la vida, se relacionan con diferentes propuestas respecto a las “secuencias diferentes de los sucesos aleatorios” que habrán de explicar la emergencia de la vida.

Aunque uno de mis objetivos en este capítulo es resaltar la función de la tesis de la continuidad como condición epistemológica necesaria en *todas* las teorías de la emergencia de la vida, no es posible ignorar las muy significativas diferencias y los puntos de desacuerdo. Acaso la más profunda distinción se corresponde con la cuestión de *cómo estaba constituido un sistema viviente primigenio*. Esta distinción tiene profundas raíces históricas en las distintas tradiciones biológicas que han surgido de las disciplinas de la bioquímica y la genética. En 1936 Oparin formuló su ya clásica teoría del origen de la vida dentro de la tradición de la bioquímica basada en el concepto medular del metabolismo.⁷² El desarrollo de la genética moderna, basado en los adelantos en la citología y en la renovación de las leyes de Mendel, generó la suposición de que las funciones genéticas —la replicación y la mutación— son más fundamentales para la vida que cualquier otra función biológica. En lo que concierne a la cuestión del origen de la vida, el debate entre estas dos concepciones se formuló sobre la base de la cuestión de si la vida había aparecido en la forma de una “molécula viviente” que tenía la capacidad de la replicación, o en la forma de un sistema polimolecular que poseía cierta heterogeneidad estructural y funcional.⁷³

Tras los descubrimientos de la biología molecular, que introdujeron nuevos conceptos en la discusión, es posible parafrasear el debate anterior con la pregunta, ¿qué apareció antes, un sistema compuesto de ácidos nucleicos capaz de autorreplicarse, o un sistema metabólico compuesto de proteínas? Es ésta una pregunta del tipo de “la gallina y el huevo”, puesto que en los organismos existentes las proteínas sólo pueden formarse gracias a la información almacenada en los ácidos nucleicos, y éstos sólo pueden replicarse y traducirse con la ayuda de las proteínas. Algunos textos actuales en el campo de la biología molecular examinan la controversia de la replicación versus el metabolismo, o de los ácidos nucleicos *versus* las proteínas. Es famoso el libro de Freeman Dyson, *Origins of Life*,⁷⁴ que atribuye igual significancia a la replicación y al metabolismo, en cuanto características de la vida, pero que sin embargo presupone, por diversas razones empíricas y lógicas, que el metabolismo debió de aparecer primero y la repli-

⁷² H. Kammaing, “The Protoplasm and the Gene”, en A. G. Cairns-Smith y H. Hartman (comps.), *Clay Minerals and the Origin of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986, pp. 1-9.

⁷³ *Ibid.*, p. 7.

⁷⁴ F. Dyson, *Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.

cación subsecuentemente en el curso de la biogénesis.⁷⁵ Otro tema de desacuerdo, en ciertos aspectos paralelos al de la controversia sobre los ácidos nucleicos y las proteínas, atañe a la cuestión de si la compartimentación en la forma de algún tipo de protocélula y la separación del sistema evolutivo respecto al medio ambiente antecedió al desarrollo de la replicación.⁷⁶ Como indicaré más adelante, existe una creciente tendencia a pensar en “soluciones intermedias”.⁷⁷

Desde hace 20 años y a pesar de sus defectos, la noción de la replicación primordial es la que predomina en este campo. Esto podría deberse a razones históricas.⁷⁸ Por añadidura, existen razones químicas para la adopción por muchos bioquímicos de la noción de un “mundo del ARN”, según la cual hubo un tiempo, antes del origen de la síntesis de las proteínas, en que la vida se basaba totalmente en el ARN.⁷⁹ Es indudable que el descubrimiento, realizado a principios del decenio de 1980, de que las moléculas de ARN tienen propiedades enzimáticas y por lo tanto son las únicas moléculas que sabemos que funcionan como genotipo y como fenotipo, fue la causa de que la biología molecular tomara en serio la noción de un “mundo del ARN”.⁸⁰

A fin de respaldar mi convicción sobre el papel fundamental de la tesis de la continuidad en la indagación de la emergencia de la vida, tendríamos que ver si las actuales teorías en este campo, cada cual a su modo, incorporan la búsqueda de las “secuencias aparte de las secuencias aleatorias” que se supone tienden un puente sobre la división entre las moléculas inorgánicas y los sistemas vivos primigenios. Ya que la teoría de Manfred Eigen es una de las más influyentes dentro de la concepción de la replicación primordial, habrá que examinar algunos de sus principios básicos. El análisis de la teoría de Eigen a la luz de la tesis de la continuidad es un interesante reto, ya que en varios de sus textos, especialmente los primeros, Eigen basó su planteamiento en la aparición preliminar de los sucesos aleatorios. Por ende, tendremos que clarificar en este caso la noción de los “sucesos aleatorios” y ver si esta teoría puede reconciliarse con la del “campo de la ley”.

⁷⁵ *Idem.*

⁷⁶ S. W. Fox y K. Dose, *op. cit.*

⁷⁷ Véase, por ejemplo, J. Wicken, *op. cit.*; C. de Duve, *op. cit.*; G. F. Joyce, *op. cit.*, p. 222; véase también F. Dyson, *op. cit.* p. 34.

⁷⁸ Dyson atribuye este hecho al impacto que tuvieron los experimentos de Max Delbrück sobre los bacteriófagos durante los decenios de 1930 y 1940, en Erwin Schrödinger y sus sucesores en el campo de la biología molecular (véase F. Dyson, *op. cit.*, pp. 3-5).

⁷⁹ Para una exposición amplia del tema véase G. F. Joyce, *op. cit.*; R. F. Gesteland y J. F. Atkins (comps.), *The RNA World*, Cold Spring Harbor Laboratory Press, Nueva York, 1993.

⁸⁰ G. F. Joyce, *op. cit.*, p. 217.

LA TEORÍA DE LA AUTOORGANIZACIÓN
MOLECULAR DE MANFRED EIGEN

Manfred Eigen publicó en 1971 un artículo que examinaba la evolución de las macromoléculas biológicas, afirmando que tal evolución sólo podía explicarse sobre la base de la preponderancia del principio darwiniano de la selección natural, no sólo en la evolución orgánica, sino también en la fase de la transición entre los sistemas inanimado y animado. Las macromoléculas que se producen a sí mismas, tales como el ARN y el ADN, en un medio ambiente adecuado, dice Eigen, muestran un comportamiento que podría calificarse de darwiniano.⁸¹ Tras la algo imprecisa replicación de los primeros oligonucleótidos se forma una población de una variedad de macromoléculas muy similares mas no idénticas: las “cuasiespecies”. Eigen asevera que la evolución molecular de las cuasiespecies, cuyo resultado es la emergencia de la autorreplicación óptima, es necesariamente el primer paso en la vía de la formación de un sistema viviente.⁸² La siguiente etapa en el modelo de Eigen, imprescindible a fin de asegurar el desarrollo del enlace funcional entre los ácidos nucleicos y las proteínas, involucra la integración de varias cuasiespecies como un sistema cooperativo.⁸³

En su artículo de 1971, Eigen planteó que la evolución empezó a partir de una matriz aleatoria. En el inicio, dice, “tuvo que haber un caos molecular, sin una anexión funcional entre la inmensa diversidad de especies químicas. Así, la autoorganización de la materia que asociamos con el ‘origen de la vida’ tuvo que haber empezado a partir de sucesos aleatorios”.⁸⁴ A Eigen se le criticó por su “actitud aleatorista”,⁸⁵ y a su modelo, el llamado “replicador aleatorio”, por basarse en la muy improbable formación accidental de una o más moléculas de ARN replicadoras.⁸⁶ En vista de estos alegatos, ¿puede reconciliarse con el “campo de la ley” la posición de Eigen? Desde mi punto de vista, la respuesta es positiva, incluso en relación con sus textos “aleatoristas”. Además, en sus trabajos posteriores hay un

⁸¹ M. Eigen, “Self-organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules”, *Naturwissenschaften*, 58: 465-523, 1971.

⁸² M. Eigen, *Steps towards Life*, *op. cit.*, p. 126.

⁸³ M. Eigen y P. Schuster, “The Hypercycle, Part A: The Emergence of the Hypercycle”, *Naturwissenschaften*, 64: 541-565, 1977.

⁸⁴ M. Eigen, “Self-organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules”, *op. cit.*, p. 467.

⁸⁵ Véase, por ejemplo, S. W. Fox, “Proteinoid Experiments and Evolutionary Theory”, en M. W. Ho y P. T. Saunders (comps.), *Beyond Neo-Darwinism*, Academic Press, Londres, 1984, p. 17.

⁸⁶ R. Shapiro, *Origins*, Bantam, Toronto, 1896, p. 164.

claro viraje hacia el énfasis en el carácter dirigido de la evolución de la vida, junto con un alejamiento de la concepción de la aleatoriedad estadística.⁸⁷

Yo pienso que cuando el rasgo “aleatorista” de Eigen se manifiesta, no es por causa de una actitud de partidario del “campo del azar”, sino más bien de un enfoque inapropiado. En muchos de sus textos, Eigen tiende a considerar, erróneamente, creo yo, que la fase prebiótica no es problemática, y a simplemente suponer que el “medio ambiente apropiado” ya existía.⁸⁸ No obstante, debe aclararse que el concepto de Eigen sobre la “aleatoriedad” poco tiene que ver con la “aleatoriedad estadística”. A diferencia de Monod, que desechó las restricciones fisicoquímicas en la formación de las proteínas prebióticas,⁸⁹ Eigen sí acepta la presencia no accidental de restricciones estructurales atómicas, moleculares e incluso supramoleculares.⁹⁰ Hay que señalar que muchos investigadores consideran esencial la noción de una selección física prebiótica basada en criterios termodinámicos que opera en la producción de secuencias particulares de ARN y de proteínas.⁹¹ Wicken, por ejemplo, enumera varios factores que intervienen en estos procesos selectivos: la actividad óptica homogénea, las capacidades de doblamiento que tienen ciertas secuencias proteínicas, la interacción hidrofóbica con el agua como factor en la estabilidad relativa de “ciertas macromoléculas y microesferas”.⁹² En una de sus últimas discusiones sobre las posibles fuentes del ácido nucleico y la quiralidad proteínica, Eigen precisa la importancia decisiva de tales requisitos físicos en el medio ambiente prebiótico.⁹³

En 1971, aunque postulando un caos molecular prebiótico, Eigen clarifica cualitativamente su postura diciendo que la aleatoriedad se limita a los aspectos funcionales.⁹⁴ En 1981, Eigen acepta la importancia de algunas “moléculas funcionales” en la “química de la sopa prebiótica”, aunque aclarando que sólo la autorreplicación y la selección natural podían haber propiciado la evolución de la propiedad de la función.⁹⁵ Eigen enfatiza en 1992 el papel de la catálisis primitiva, ya mencionada en sus trabajos anteriores, cuando al responder la pregunta,

⁸⁷ M. Eigen, *Steps towards Life*, *op. cit.*

⁸⁸ M. Eigen y P. Schuster, “The Hypercycle, part C: The Realistic of the Hypercycle”, *Naturwissenschaften*, 65: 341-369, 1978, específicamente p. 346.

⁸⁹ J. Monod, *op. cit.*, p. 65.

⁹⁰ M. Eigen, “Self-organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules”, *op. cit.*, p. 467, nota 1; M. Eigen *et al.*, “The Origin of Genetic Information”, *Scientific American*, 244 (4): 88-92, 1981, específicamente p. 82.

⁹¹ Véase, por ejemplo, C. de Duve, *op. cit.*, pp. 141-142.

⁹² Véase J. Wicken, *op. cit.*, pp. 108-109.

⁹³ M. Eigen, *Steps towards Life*, *op. cit.*, p. 35.

⁹⁴ M. Eigen, “Self-organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules”, *op. cit.*

⁹⁵ M. Eigen *et al.*, *op. cit.*, p. 82.

“¿cómo se originaron las primeras moléculas autorreproductoras?”, habla de la función de la catálisis que, a pesar de ser menor, probablemente habría sido desempeñado por las proteínas, “sin duda las primeras [...] en aparecer en escena”.⁹⁶ Así, Eigen no sólo propone un escenario prebiótico donde varias limitaciones físicas y químicas propiciaron ciertas orientaciones evolutivas, sino que subraya la importancia de las sustancias catalíticas —sobre todo los proteinoides, pero también las ribozimas y los iones metálicos— que pudieron superar la enorme improbabilidad que imperaba en un “escenario aleatorio” del tipo de Monod.⁹⁷

El rechazo por Eigen del “escenario aleatorio” es aún más tajante en relación con la cuestión de cómo surgieron los genes óptimos —secuencias de ARN capaces de autorreplicarse con una relativamente alta fidelidad—. *La información genética, según Eigen, no pudo haber evolucionado a partir del azar*. Más bien, la generación de un mutante superior —en términos de una mayor fidelidad de la replicación, la estabilidad, y específicamente la tasa de la replicación— en una población de macromoléculas autorreplicadoras, tuvo que ser *el resultado de determinada cadena de sucesos causal*.⁹⁸ A esta conclusión se llega mediante un *análisis cuantitativo y detallado* de la distribución de las secuencias en una población de macromoléculas de las cuasiespecies, análisis que no era posible en la genética clásica, pero que hoy han posibilitado las técnicas de la biología molecular moderna.⁹⁹ Las ramificaciones de su concepción de las cuasiespecies involucran una *reformulación del clásico punto de vista neodarwiniano* que se apoya mucho en el carácter totalmente aleatorio de las mutaciones y consecuentemente en la naturaleza completamente oportunista del desarrollo evolutivo.¹⁰⁰ La teoría de las cuasiespecies niega la suposición clásica de que “todo mutante aparece con una probabilidad que es independiente de que sea una variante superior, neutral o

⁹⁶ M. Eigen, *Steps towards Life*, op. cit., pp. 29-32.

⁹⁷ *Ibid.*, pp. 32-33. La oposición a la aleatoriedad de Eigen puede servir como un buen argumento contra la perspectiva propuesta por otro archiseleccionista, Richard Dawkins, tanto en *The Selfish Gen* (*El gen egoísta*) de 1976 como en *The Blind Watchmaker* (*El relojero ciego*). En este último libro, Dawkins dice que tenemos que presuponer “un suceso aleatorio de un solo paso en el origen de la selección acumulativa misma” (p. 140). Al igual que Monod, Dawkins ve este “suceso aleatorio” como la única alternativa al *designio*. Aunque considera que el modelo de arcilla de Cairns-Smith es un ejemplo del mecanismo capaz de propiciar la vida, Dawkins finalmente confía en la capacidad de la enorme extensión del espacio y el tiempo en el universo para posibilitar incluso el suceso más milagroso (pp. 141-166).

⁹⁸ M. Eigen, *Steps towards Life*, op. cit., p. 25.

⁹⁹ El modelo eigeniano de la cuasiespecie se limita matemáticamente a poblaciones lo suficientemente grandes (10^{10} - 10^{12}) en que el contenido de la información no excede 10^3 - 10^6 nucleótidos. Tales límites son aplicables a las poblaciones de moléculas replicadoras, a los virus y a los microorganismos (*Steps towards Life*, op. cit., p. 82). Las predicciones de la teoría matemática, dice Eigen, han sido confirmadas por los virus de ARN y por diversos sistemas de laboratorio (*ibid.*, p. 29).

¹⁰⁰ M. Eigen, *Steps towards Life*, op. cit., pp. 22-30.

inferior”.¹⁰¹ En el proceso de la evolución molecular, según Eigen, la selección no tiene por objetivo el tipo silvestre que produce mutaciones al azar en una forma enteramente aleatoria. De hecho, en una cuasiespecie el “tipo silvestre” jamás resulta individualmente victorioso, y el objeto de la evaluación selectiva es más bien la cuasiespecie en conjunto, el conjunto total de los mutantes coexistentes.¹⁰²

La formulación cuantitativa realizada por Eigen de la teoría de la autoorganización molecular se basa en el concepto del *espacio secuencial*, un espacio imaginario donde el número de puntos es igual al número de todas las posibles secuencias. En este espacio, cada secuencia nucleótida ocupa una sola posición. Las posiciones tienen un ordenamiento que refleja el parentesco secuencial entre todas y cada una de las posibles variantes. Los procesos de la evolución molecular y la generación de mutantes todavía superiores puede representarse como un “andar” a través de la “topografía de la idoneidad” del espacio secuencial. Un factor decisivo en la estructura de la cuasiespecie se relaciona con la existencia, dentro de cada población replicadora, de muchos *mutantes neutrales*, cuya idoneidad —y habilidad para replicarse— es ligeramente o nada diferente de la del tipo salvaje.¹⁰³ Como resultado de la estructura de la cuasiespecie y del hecho de que la idoneidad de la población entera se evalúa en conjunto, la cantidad de mutantes específicos en la población depende no sólo del grado de su parentesco con el tipo silvestre (como en el modelo clásico) sino de su tasa específica de replicación y de su distribución en el “espacio secuencial”.¹⁰⁴

Los mutantes neutrales o casi neutrales están mucho mejor representados que los demás por causa de su relativamente eficaz autorreplicación. Además, su cantidad relativa se ve afectada por la idoneidad de sus vecinos en el espacio secuencial. No sólo se replica a sí mismo un mutante eficaz, sino que también surge por la replicación errónea de sus vecinos eficaces. Así, casi todos los mutantes surgen en las “regiones montañosas” del territorio de la idoneidad, cerca de la cima de la optimización.¹⁰⁵ Esta dinámica conduce a un cambio en la cantidad de mutantes de la población. De esta manera se introduce una preferencia en el desarrollo de la cuasiespecie en conjunto, y la evolución parece dirigirse hacia la producción de mutantes superiores. “Este carácter dirigido del proceso evolutivo

¹⁰¹ *Ibid.*, p. 23.

¹⁰² *Ibid.*, p. 27.

¹⁰³ Véase M. Kimura, *The Neutral Theory of Molecular Evolution*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983.

¹⁰⁴ M. Eigen, *Steps towards Life*, *op. cit.*, pp. 24-27.

¹⁰⁵ *Ibid.*, pp. 27-28.

—dice Eigen— es acaso la más clara expresión del cambio paradigmático actual en el modelo del mundo darwiniano.”¹⁰⁶

Ese cambio paradigmático que da indicios de un elemento determinista en la evolución de la autoorganización molecular le permite a Eigen fundamentar su convicción de que la selección natural es el principio físico del orden que opera en la emergencia de la vida. Si no fuera así, la interpretación clásica de la selección natural, según la cual la producción de mutantes es completamente aleatoria, no podría solucionar el problema de la emergencia de la complejidad.¹⁰⁷ La reinterpretación del principio de la selección natural es la antítesis de la noción (con toda probabilidad físicamente imposible) de que la información genética se produjo mediante una síntesis puramente aleatoria.¹⁰⁸

Más adelante se verán algunos aspectos de las etapas sucesivas del modelo de Eigen, pero ahora podríamos regresar a la pregunta inicial de si es o no posible reconciliar las ideas de Eigen con el “campo de la ley”. No cabe duda que la respuesta, basada en la anterior presentación del planteamiento de Eigen, es definitivamente afirmativa. Ya que a Eigen se le criticó frecuentemente por su teoría de la “replicación aleatoria”, su énfasis en el aspecto determinista de la tesis de la continuidad es especialmente significativo. Debemos recordar aquí que en varias ocasiones Eigen expresó su opinión de que la vida es probablemente un fenómeno universal:

La evolución de la vida, si se basa en un principio físico derivable [el principio de la selección natural] debe verse como un *proceso inevitable* [...] no sólo en principio, sino también como suficientemente probable en un periodo de tiempo razonable. Requiere las adecuadas condiciones ambientales (que no se dan en todas partes) y su mantenimiento. Estas condiciones existieron en la Tierra y todavía deben de existir en muchos planetas del universo.¹⁰⁹

¹⁰⁶ *Ibid.*, p. 29.

¹⁰⁷ *Ibid.*, p. 23. Por el hecho de que el camino hacia un mutante superior no se interrumpe. Si el sistema tuviera que ensayar todas las mutaciones posibles a fin de encontrar una ventaja, como se supone en la genética clásica, no sería posible explicar el origen de la complejidad (de los genes óptimos) (*ibid.*, pp. 22-23).

¹⁰⁸ *Ibid.*, p. 11.

¹⁰⁹ M. Eigen, “Self-organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules”, *op. cit.*, p. 519.

ALGUNOS DE LOS PROBLEMAS EN LA TEORÍA DE EIGEN
Y EN LAS TEORÍAS DEL MUNDO DEL ARN

Recapitulemos. En el inicio de este capítulo expuse la tesis de la continuidad que basa la emergencia y la evolución de la vida en principios físicos universales, alegando que la emergencia de la vida no puede deberse al ciego azar. Luego afirmé que uno de mis propósitos era demostrar que esta tesis es el fundamento de varios modelos propuestos en el campo del origen de la vida. Eigen ha elaborado una teoría de la evolución de la información genética en poblaciones de moléculas autorreplicadoras, que a pesar de que aparentemente se basa en la aleatoriedad, ha sido decisiva como caso ilustrativo. Ahora ha llegado el momento de señalar que la tesis de la continuidad se encuentra en otras teorías del origen de la vida que difieren de la de Eigen en algunos puntos básicos.

Ya se dijo que la idea de que un aparato autorreplicador basado en el ARN haya sido el primer “mundo” químico en el camino a la vida es bastante común en el campo del origen de la vida. En los últimos tiempos, un número creciente de químicos en este campo ha empezado a dudarlo. Aunque estén de acuerdo en que el ARN probablemente tuvo un papel importante en la historia primigenia de la vida, actualmente se preguntan qué precedió la aparición de la autorreplicación del ARN. Gerald Joyce, un prominente especialista en el campo, haciendo una amplia revisión del problema discute diversas objeciones a la noción del “ARN primordial”. La primera se basa en la obvia ventaja que tienen las proteínas sobre el ARN respecto a la potencia catalítica, incluso si se toma en cuenta el descubrimiento del ARN catalítico (de las ribozimas).¹¹⁰ La segunda, más seria, objeción, tiene que ver con las tremendas dificultades, de hecho, con la improbabilidad de la síntesis prebiótica del ARN.¹¹¹

Joyce examina metódicamente todas las vías químicas posibles que pudieron haber dado por resultado la síntesis de los elementos constitutivos requeridos del ARN, basándose en datos proporcionados por la geoquímica, la química prebiótica y la bioquímica del ácido nucleico. Enfoca los principales escollos en esta sín-

¹¹⁰ G. F. Joyce, *op. cit.*, p. 218. Debe añadirse que incluso si se les otorga a las ribozimas un papel central en el mundo del ARN, con base en descubrimientos recientes en que el ARN actúa como una enzima replicadora de sí misma, es obvio que la ARN-replicasa no pudo haber surgido de un *pool* aleatorio de secuencias de ARN, y que fue necesaria la participación de cofactores y de reacciones no aleatorias (D. P. Bartel y J. W. Szostak, “Isolation of New Ribozymes from a Large Pool of Random Sequences”, *Science*, 261: 1411-1418, 1993).

¹¹¹ G. F. Joyce, *op. cit.*, p. 219.

tesis¹¹² y, además, menciona varias posibles inhibiciones laterales e interferencias isoméricas entre los diversos elementos constitutivos (suponiendo que pudieron haberse formado), que hubieran imposibilitado la síntesis del ARN. La interpretación más razonable, concluye Joyce, es que “la vida no se inició con el ARN. El mundo de ARN pudo existir cuando se solucionaron muchos de los problemas asociados con la síntesis prebiótica y la replicación del ARN dirigida por un templete”.¹¹³

Según Joyce, son tres las maneras en que pudieron disminuir los impedimentos a un mundo del ARN preliminar. Primero, la vida no se originó con la autorreplicación. Como resultado más bien de la evolución química, procesos no dirigidos gradualmente cambiaron el medio ambiente químico, principalmente a través del “ordenamiento químico de las complejas estructuras péptidas, y posiblemente de la formación de microesferas o vesículas membranosas”. Esta etapa facilitó la posterior aparición de la autorreplicación. Segundo, el desarrollo de un sistema autorreplicador primitivo; por ejemplo, una superficie mineral, según Cairns-Smith, pudo haber servido como patrón para la formación de capas minerales adicionales. Según Cairns-Smith, esos *organismos de arcilla* primero hubieron de sintetizar las moléculas de ARN que funcionaron como catalizadores en los mundos minerales. Con el tiempo, los catalizadores de ARN “se apoderaron” de la función genética.¹¹⁴ Tercero, la química del medio ambiente prebiótico hizo posible la aparición de sistemas autorreplicadores semejantes al ARN que se podían sintetizar más fácilmente; por ejemplo, un material genético que se basaba en las purinas o que utilizaba glicerol en vez de ribosa. Sin embargo, Joyce señala tres obstáculos que toda autorreplicación química enfrenta, los tres relacionados con la actividad catalítica. Por lo tanto, las tres alternativas pueden reducirse a la primera opción; Joyce concluye que fue necesario un periodo de evolución química para que pudiera surgir con el tiempo el sistema genético basado en algunas moléculas sencillas similares al ARN.¹¹⁵

Aunque Eigen sí se basa en las proteínas catalíticas para la fase preliminar de su modelo, la opción de una evolución química que atribuya el papel inicial primordial a las proteínas catalizadoras y no a las macromoléculas autorreplicadoras puede servir como una interesante alternativa al modelo de Eigen. Uno de los problemas más difíciles que enfrentan las teorías que plantean la autorreplicación como primera fase de la vida, es la necesidad de copias casi perfectas. La replica-

¹¹² *Ibid.*, pp. 220-221.

¹¹³ *Ibid.*, p. 222.

¹¹⁴ A. G. Cairns-Smith, *op. cit.*

¹¹⁵ G. F. Joyce, *op. cit.*, pp. 222-223.

ción de oligómeros prebióticos supuestamente implica los suficientes errores como para darle a la selección natural las materias primas con que trabajar. Sin embargo, demasiados errores destruirían toda la información. Freeman Dyson piensa que son irreales los estrechos límites dentro de los cuales tenía que darse la replicación en un escenario prebiótico. Él considera que la *tolerancia al error* es el requerimiento primordial en el modelo de una población molecular emergente.¹¹⁶ Es ésta una de las razones de que prefiera un modelo semejante al de Oparin, según el cual la vida en el inicio surgió como un sistema metabólico cerrado compuesto de una población de oligopéptidos catalíticamente activos, cada uno de los cuales reordenaba la estructura de otro. Las ideas de Dyson sobre el origen de la vida se basan, también, en que él describe las “características esenciales de las células vivientes” como la “homeostasis, la habilidad para mantener en un ambiente cambiante un equilibrio químico estable y más o menos constante”.¹¹⁷ Él piensa que el desarrollo de la replicación vino más tarde, siendo posible sólo en el contexto de la evolución del código genético, de los ribosomas y de los cromosomas.¹¹⁸

¿Cómo explica Eigen el problema que surge en un sistema donde las primeras moléculas replicadoras supuestamente tuvieron que arreglárselas sin enzimas informadas y por lo tanto tenían que tolerar altos grados de error? Tales grados de error limitaban la dimensión secuencial de las moléculas replicadoras a oligonucleótidos cortos (de 100 o menos nucleótidos). A fin de mejorar la replicación, obviamente tuvo que aparecer un mecanismo primitivo de traducción a proteínas. Sin embargo, este objetivo no pudo haberse logrado con dichos oligonucleótidos cortos. La respuesta de Eigen a este “callejón sin salida del origen de la vida” es la *cooperación*.¹¹⁹ Según Eigen, el gran paso adelante en la evolución molecular que permitió el desarrollo de sistemas vivientes avanzados, probablemente se propició por la integración de diversas unidades autorreproductoras en un sistema cooperativo.

Un mecanismo capaz de semejante integración, que pueda asegurar la emergencia de vínculos funcionales entre los ácidos nucleicos y las proteínas, sólo puede proporcionarse por los *hiperciclos*.¹²⁰ La unidad básica del hiperciclo propuesto por Eigen consiste en un círculo de retroalimentación en el cual algunos de los productos traducidos de una secuencia de ARN tienen un efecto benéfico

¹¹⁶ F. Dyson, *op. cit.*, p. 73.

¹¹⁷ *Ibid.*, p. 61.

¹¹⁸ *Ibid.*, p. 74.

¹¹⁹ J. Maynard Smith, *The Problems of Biology*, Oxford University Press, Oxford, 1986, p. 118.

¹²⁰ M. Eigen y P. Schuster, “The Hypercycle, part A: The Emergence of the Hypercycle”, *op. cit.*, p. 563.

en el potencial reproductor de su *propio* genotipo específico.¹²¹ Sin embargo, a fin de movilizar el contenido informativo de varias secuencias de ARN (varios genes) que no pueden combinarse en una cadena molecular continua a causa del umbral de error relacionado, Eigen propone un hiperciclo más complejo.¹²² Así, él se figura la existencia de una serie cíclicamente ordenada de unidades autorreplicadoras donde el producto intermedio de un ciclo se utiliza por el siguiente en la serie.¹²³

No obstante, es necesario señalar que el modelo del hiperciclo de Eigen presupone lo que tiene que explicar en el inicio.¹²⁴ A fin de que sea factible el concepto del hiperciclo, Eigen tiene que suponer la existencia de “mecanismos más o menos específicos para la traducción de secuencias de ARN en moléculas proteínicas”.¹²⁵ Según Christian de Duve, el descuido de no especificar cómo tuvo lugar un mecanismo basto de traducción, al igual que el de no especificar cómo surgieron las primeras moléculas de ARN, se originan ambos en el hecho de no fijarse en las actividades catalizadoras de los oligopéptidos, sin los cuales el mundo del ARN no se hubiera materializado.¹²⁶

Jeffrey Wicken cuestiona todavía más la noción del hiperciclo de Eigen con base en consideraciones de tipo químico y filosófico.¹²⁷ Wicken acepta que la cuasiespecie replicadora es el “aspecto más sustentado empíricamente y más justificado teóricamente del darwinismo molecular”.¹²⁸ No obstante, él afirma que las secuencias de ARN no podían empezar a servir como patrones para la síntesis proteínica en un marco de cuasiespecies que promoviera la selección *para una mejor replicación*. Por otra parte, Wicken hace notar que la información para hacer proteínas funcionales le resulta onerosa a los replicadores simples. “La génesis y la estabilización evolutivas de la información genética [información para las proteínas] requieren que ésta tenga un referente funcional para el cual sea útil.”¹²⁹ Según Wicken, el referente para el cual la información para hacer proteínas catalizadoras pudo ser útil, podría haber sido un *conjunto catalizador*; por ejemplo, una microesfera como la propuesta por Sidney Fox,¹³⁰ o, podríamos añadir, una

¹²¹ M. Eigen, *Steps towards Life*, op. cit., p. 41. Eigen afirma que recientemente se ha demostrado que un hiperciclo opera en el mecanismo de la infección de células huésped por los virus (*ibid.*, p. 42).

¹²² *Ibid.*, p. 41.

¹²³ M. Eigen et al., op. cit., p. 89.

¹²⁴ C. de Duve, op. cit., p. 187.

¹²⁵ M. Eigen, *Steps towards Life*, op. cit., p. 4.

¹²⁶ C. de Duve, op. cit., p. 133.

¹²⁷ J. Wicken, op. cit.

¹²⁸ *Ibid.*, p. 107.

¹²⁹ *Ibid.*, p. 104.

¹³⁰ *Idem.*

“unidad metabólica de Dyson”. Al igual que Dyson, quien menciona el desarrollo de algún tipo de organización de ribosomas como un prerequisite de la emergencia de la traducción, Wicken cita varios experimentos que indican la formación de partículas a partir de proteinoides ricos en lisina catalíticamente activos, con proteinoides ácidos y ácidos nucleicos. Estos productos podrían considerarse como prototipos de ribosomas tanto en la estructura como en la función.¹³¹

Al parecer los dos puntos de vista, el del “replicador primordial” y el de la “célula primordial”, están muy distanciados. Así parece, especialmente cuando se considera la cuestión de la compartimentación. Hay una famosa cita de Eigen, en el sentido de que la organización de las células se pospuso el mayor tiempo posible.¹³² Por otra parte, basándose en Oparin, para quien la formación de un coacervado (una gota separada de su entorno) era una condición necesaria para la emergencia de la vida, diversos investigadores en el campo continúan proponiendo la existencia de la célula primordial. El más conocido es Sidney Fox, cuyas esferas proteinoides, producidas con el método de remover en agua aminoácidos polimerizados, ya mencionamos antes.¹³³ Otro partidario de la compartimentación primigenia es Harold Morowitz, quien basándose en la energética, dice que “la necesidad de aislar termodinámicamente un subsistema es una condición irreductible para la vida [...] el desarrollo evolutivo complejo en un medio ambiente acuoso no compartimentado [...] es un impedimento extraordinario para contrarrestar la difusión y las otras consecuencias disipadoras de la segunda ley de la termodinámica”.¹³⁴ Para Morowitz, la formación de una vesícula por el cierre de una membrana fosfolípida de dos capas representa “una transición discreta de la no vida a la vida”.¹³⁵

El énfasis de Eigen en el “hiperciclo primero, la compartimentación en segundo lugar” es característico de sus primeros trabajos. Más recientemente, él ha dicho que “ambas formas de organización (el acoplamiento hipercíclico y la compartimentación) *son a la vez necesarias*”.¹³⁶ Eigen señala varias razones químicas para que las protocélulas no pudieran formarse antes de la autoorganización del hiperciclo. Al mismo tiempo, los hiperciclos no podían generarse sin “deshacer la homogeneidad de la sopa”.¹³⁷ Los concomitantes hiperciclos y compartimentacio-

¹³¹ *Ibid.*, p. 105.

¹³² M. Eigen *et al.*, *op. cit.*, p. 107.

¹³³ W. Fox y K. Dose, *op. cit.*

¹³⁴ H. C. Morowitz, *op. cit.*, p. 8.

¹³⁵ *Ibid.*, p. 9.

¹³⁶ M. Eigen, *Steps towards Life*, *op. cit.*, p. 109.

¹³⁷ *Op. cit.*, p. 43.

nes de Eigen no parecen ser diferentes de la idea de Wicken de que “una posibilidad más realista es que la vida emergió mediante la coevolución de ácidos nucleicos y proteínas dentro de microesferas catalíticas”.¹³⁸ (Para una hipótesis similar que expone el desarrollo de hiperciclos dentro de una “microesfera de Fox” o una “vesícula de Morowitz”, véase B. H. Weber y sus colegas, p. 385, y C. Bresch y sus colegas.¹³⁹) Ya hemos mencionado las ideas de Joyce sobre un periodo de evolución química en que las proteínas se estructuraron como unidades compartimentadas, como una etapa más probable en la transición hacia el mundo del ARN. Desde mi punto de vista, estos modelos son todos ejemplos de *soluciones intermedias* que reflejan la necesidad de superar la supuesta improbabilidad de ciertas etapas, improbabilidad en que se basan los modelos unilaterales. Estas soluciones intermedias son, pues, otra manifestación de *la tesis de la continuidad* en la práctica.

LA TESIS DE LA CONTINUIDAD EN LAS TEORÍAS DE LA CÉLULA PRIMORDIAL

Ya hemos discutido la tesis de la continuidad como Harold Morowitz la formula. Sidney Fox y sus colegas, durante muchos años los principales promotores de la noción de la célula primordial, ven en la tesis de la continuidad su marco filosófico fundamental. Basándose en simulaciones experimentales de la evolución química, Fox y su grupo han concluido que la biogénesis no se gobernó por sucesos aleatorios, sino que más bien fue “obligada y dirigida” por las propiedades fisicoquímicas de las reacciones de las sustancias.¹⁴⁰ Mientras que para Eigen el principio del orden que combina los dominios físico y biológico es el principio de la selección natural, Fox enfatiza la importancia de la selección no darwiniana en el nivel molecular, la cual funciona según el criterio termodinámico de la estabilidad.

En primer lugar, dice Fox, la síntesis prebiótica de los aminoácidos no es estadísticamente aleatoria. En segundo lugar, tales aminoácidos contienen las instrucciones para su propio ordenamiento como polímeros “de un tipo extremadamente no aleatorio”.¹⁴¹ En tercer lugar, estos polímeros, los cuales muestran actividad catalítica, en el agua se autoensamblan para formar microesferas, proceso

¹³⁸ J. Wicken, *op. cit.*, p. 106.

¹³⁹ B. H. Weber *et al.*, “Evolution in Thermodynamic Perspective: An Ecological Approach”, *Biology and Philosophy*, 4: 373-406, 1989; C. Bresch *et al.*, “Hypercycles, Parasites and Packages”, *Journal of Theoretical Biology*, 85: 399-405, 1980.

¹⁴⁰ W. Fox y K. Dose, *op. cit.*

¹⁴¹ S. W. Fox, “Life from an Orderly Cosmos”, *Naturwissenschaften*, 67: 576-581, 1980, p. 579.

internamente controlado por fuerzas intermoleculares selectivas.¹⁴² S. Fox y sus colaboradores adoptan la idea de Oparin de que “el desarrollo de las primeras formas de vida en la tierra no fue un solitario ‘feliz suceso’ [...] sino un suceso cuya repetición fue parte integral del desarrollo general de la materia”.¹⁴³ Por lo tanto predicen la posibilidad de la producción de aminoácidos, proteínas y microesferas en otros cuerpos celestes, si se presentan los precursores requeridos, principalmente los compuestos de carbono y el agua. El modelo de Fox es criticado severamente por muchos en el campo del origen de la vida, y se cuestionan muchas de sus nociones, principalmente la idea de que la formación de los proteínoides represente un proceso de autoordenamiento. También se cuestiona la verosimilitud de su perspectiva y la relevancia biogénica de sus microesferas.¹⁴⁴ No obstante, ya hemos visto que ciertos aspectos importantes del modelo de la replicación de Eigen, así como del modelo termodinámico y organicista de Wicken, se apoyan en la teoría de Fox. En nuestra discusión, el punto crucial es el importante papel que tiene la tesis de la continuidad en esta teoría.

Recientemente, un nuevo paradigma evolucionista basado en la termodinámica del no equilibrio le atribuye a la segunda ley de la termodinámica una función medular en la evolución. Existe una correlación muy estrecha entre la tesis de la continuidad, tal como este trabajo la expone, y los principios fundamentales del nuevo “paradigma”. Primero, hay una insistencia explícita en la naturaleza continua de todas las fases de la evolución, todas ellas gobernadas por leyes. Se considera que los fenómenos biológicos no sólo se derivan de las leyes físicas. “Algunas de sus características más fundamentales son consecuencia directa de tales leyes.”¹⁴⁵ Segundo, se enfatiza no sólo la continuidad de los sistemas físico y biológico, sino también la unicidad de este último. Jeffrey Wicken, uno de los fundadores del nuevo paradigma, afirma de manera explícita su propósito de formular los principios de la continuidad que conecten la vida con la previda, y su convencimiento de que la termodinámica proporciona el necesario tejido conceptual conectivo. Combinando el punto de vista “físicista” y el “organicista”, él define la vida, basándose en principios físicos generales, como un ejemplo de una “estructura disipadora”, “un sistema que mantiene un alto grado de orden interno mediante la disipación de entropía en el entorno”. Sin embargo, el sistema viviente es único porque implica información, y por ende organización —término este que

¹⁴² W. Fox y K. Dose, *op. cit.*, p. 242.

¹⁴³ A. I. Oparin, “Forward”, en S. W. Fox y K. Dose, *op. cit.*, p. VII.

¹⁴⁴ R. Shapiro, *op. cit.*, pp. 191-205.

¹⁴⁵ D. L. Hull, “Introduction”, en B. H. Weber, D. P. Depew y J. D. Smith (comps.), *Entropy, Information and Evolution*, MIT Press, Cambridge, 1988, p. 3.

Wicken aplica exclusivamente a los sistemas informados, tanto los biológicos como los sociales—. ¹⁴⁶ Como ya lo había señalado Wicken en su crítica a Eigen, la generación de la información sólo es posible en un contexto organicista.

Wicken asevera que *la disipación mediante la estructuración* es un principio evolutivo primario. Todas las fases de la evolución, empezando por los orígenes cósmicos e incluyendo tanto la emergencia como la evolución de la vida, se conectan causalmente con la segunda ley de la termodinámica. ¹⁴⁷ Al contrario de lo que muchos piensan, la formación de estructuras de creciente complejidad no contradice la segunda ley. De hecho, ya que “el ensamblaje de entes más pequeños a fin de formar entes más grandes genera entropía mediante la transformación de la energía potencial en energía térmica”, ¹⁴⁸ esta ley propició el proceso de la estructuración, por ejemplo, de la producción de diversos compuestos químicos en la fase prebiótica. En esta etapa, la selección hubo de “elegir” con base en la estabilidad termodinámica. Al ingresar en su fase biótica la evolución, la termodinámica del no equilibrio se volvió importante en la selección. ¹⁴⁹ De hecho, según el nuevo paradigma, los “sistemas biológicos se estabilizan lejos del equilibrio *mediante* estructuras que se autoorganizan y autocatalizan, funcionando como vías para la disipación de la energía y las sustancias inutilizables [... así] *la producción y la organización de la entropía se correlacionan positivamente*”. ¹⁵⁰ Por esta razón la evolución biológica se considera un proceso entrópico donde existe una conformación de la estructura, a pesar de la tendencia universal al agotamiento del potencial termodinámico. ¹⁵¹

La dicotomía del “fiscismo” versus el “organicismo” no es la única que se trasciende en la teoría de Wicken y en el nuevo “paradigma”. También el azar y la necesidad se “fusionan” con base en la termodinámica. El concepto de Wicken de la termodinámica de la evolución habla de la “aleatoriedad microscópica” en el marco de la ley macroscópica. ¹⁵² Puesto que uno puede predecir la dirección que los procesos toman con base en la producción de entropía, “la termodinámica nos permite preguntar por qué ocurren los procesos, de una manera totalmente materialista”. En su *Consequences of Nonequilibrium Thermodynamics for Darwin-*

¹⁴⁶ J. Wicken, *Evolution, Thermodynamics, and Information*, Stanford University Press, Nueva York, 1987, p. 32.

¹⁴⁷ *Ibid.*, p. 5.

¹⁴⁸ *Ibid.*, p. 72.

¹⁴⁹ *Ibid.*, p. 109.

¹⁵⁰ B. H. Weber *et al.*, “Evolution in Thermodynamic Perspective: An Ecological Approach”, *Biology and Philosophy*, 4, 373-406, 1989, p. 375. Las cursivas son mías.

¹⁵¹ J. Wicken, *op. cit.*, p. 72.

¹⁵² *Ibid.*, p. 129.

ism [Consecuencias para el darwinismo de la termodinámica de no equilibrio], Depew y Weber mantienen que los modelos del no equilibrio pueden proporcionar “una serie de principios que muestran por qué la evolución de los sistemas biológicos es *algo que se debe esperar*, en vez de ser algo que sea necesario explicar con base en un fondo teórico que no lo anticipa firmemente”.¹⁵³

Hay que mencionar aquí otro proyecto teórico con un planteamiento filosófico similar al del paradigma termodinámico. Stuart Kauffman y sus colegas investigan los modelos matemáticos de ciertos sistemas biológicos complejos, y recientemente han propuesto la existencia de un principio clave que le pudo dar forma al desarrollo de la vida —“la autoorganización espontánea: la tendencia de los sistemas dinámicos complejos a caer en un estado ordenado sin ningún tipo de presión selectiva”—. Según ellos, la conjunción de la autoorganización espontánea y la acción moldeadora de la selección natural es responsable del hecho de que “la evolución no sólo es una serie de accidentes”.¹⁵⁴ Basándose en el análisis matemático y en un modelo computarizado, Kauffman y su colaborador Doyne Farmer proponen una configuración del origen de la vida donde una “serie autocatalítica” de oligopéptidos catalíticos que incluye un metabolismo primitivo integró la fase inicial.¹⁵⁵

En resumen, todas las teorías que aquí se han expuesto, a pesar de sus diferencias, plantean como una alternativa de los “sucesos aleatorios” a cierta dinámica física de la autoorganización que sería responsable de la emergencia de la vida. De hecho, les dan continuidad a las ideas que Alexander Oparin y J. B. S. Haldane originalmente expusieron en sus respectivos trabajos de 1924 y 1929, los cuales originaron el estudio moderno del origen de la vida. Ambos trabajos contienen la idea fundamental de que la vida en la tierra fue precedida por una larga evolución química de los compuestos orgánicos, y la noción de la existencia de formas intermediarias en la transición hacia las células primigenias. Ambos postulan un medio ambiente primigenio completamente diferente del de la Tierra hoy e intentan describir la configuración específica de las primeras etapas de la evolución prebiótica. No obstante, entre ambos trabajos hay diferencias importantes. Mientras que Oparin desarrolló sus ideas en el contexto de la por entonces

¹⁵³ D. J. Depew y B. H. Weber, “Consequences of Nonequilibrium Thermodynamics for the Darwinian Tradition”, en B. H. Weber, D. J. Depew y J. D. Smith (comps.), *op. cit.*, p. 318. Las cursivas son mías.

¹⁵⁴ M. M. Waldrop, “Spontaneous Order, Evolution and Life”, *Science*, 274 (4950): 1543-1545, 1990, en especial, p. 1543; S. A. Kauffman, “Antichaos and Adaptation”, *Scientific American*, 265 (2): 78-84, 1991, en especial, p. 78.

¹⁵⁵ M. M. Waldrop, *op. cit.*, p. 1543; véase también S. A. Kauffman, *The Origins of Order. Self-organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, Oxford, 1993.

muy popular bioquímica coloidal, Haldane se acercó a la cuestión del origen de la vida vía el descubrimiento de los virus. Haldane dice que los “entes vivientes o medio vivientes primigenios [...] sólo fueron capaces de reproducirse”; compara el medio prebiótico y su diversidad de moléculas con la célula huésped de los virus actuales; y alega que la célula demoró mucho en compartimentarse.¹⁵⁶

A diferencia de Oparin, que fue el primero en proponer la “célula primigenia”, la de Haldane podría llamarse la propuesta del “gen desnudo”. Aún así, ambos son los padres de la hipótesis Oparin-Haldane, un gran paso adelante cuya enorme importancia yace en sus principios filosóficos. La perspectiva sobre el origen de la vida de Oparin-Haldane frecuentemente se identifica con la hoy muy criticada idea de que los compuestos orgánicos pudieron haberse acumulado en la “sopa prebiótica” bajo condiciones atmosféricas reductoras. No obstante, la contribución filosófica principal de las ideas conjuntas de Oparin y Haldane fue el establecimiento de la tesis de la continuidad.

EL VALOR HEURÍSTICO DE LA TESIS DE LA CONTINUIDAD

Hasta aquí mi análisis ha indicado que los científicos en este campo intentan, cada cual según sus inclinaciones científicas, químicas o físicas, sustentar con aseveraciones y detalles materialistas específicos la tesis filosófica de la continuidad. En el inicio de este trabajo mencioné varios “principios de la continuidad”, como ejemplos de la heurística positiva de la tesis de la continuidad. Sin embargo, hasta donde sea posible deducirlo de los textos examinados, es patente que en la mayoría de los casos la tesis se asume de manera implícita. Yo sostengo que el hecho de estar consciente del papel epistemológico de la tesis tiene como consecuencia el esfuerzo deliberado por crear modelos más probables que puedan tender un puente sobre el abismo entre la vida y la materia inorgánica. Los principios filosóficos de la “escuela termodinámica” expresan de manera explícita esta motivación. Un buen ejemplo de la ventaja heurística de la tesis de la continuidad lo proporciona el trabajo de Christian de Duve.

Como ya se indicó, De Duve cree que es necesario asumir que casi todos los pasos sucesivos en la emergencia de la vida tenían una muy alta probabilidad de suceder. La única alternativa a esta suposición es la noción anticientífica de un

¹⁵⁶ J. B. S. Haldane, “The Origins of Life”, en J. D. Bernal, *The Origin of Life*, Wiedenfeld and Nicholson, Londres, 1967, p. 247.

origen milagroso.¹⁵⁷ De Duve deliberadamente opta por la tesis de la continuidad y la utiliza para examinar si los modelos propuestos en este campo son aceptables en la forma que se formulan o si es necesario mejorarlos. De acuerdo con su reconstrucción, la vida emergente pasó a través de cuatro principales “mundos” sucesivos: el mundo prebiótico primigenio, el mundo del tioéster, el mundo del ARN, y el mundo del ADN. La contribución de Christian de Duve —*la introducción del mundo del tioéster* en este esquema— para él es esencial “porque yo no puedo aceptar la idea de que un mundo del ARN surgiera mediante una química puramente aleatoria”.¹⁵⁸

Aunque De Duve puntualiza que esta química aleatoria está determinada en alto grado por factores físicos y químicos, sin embargo cree que la determinación fisicoquímica de los productos en la fase prebiótica no es suficiente para sustentar con “carne materialista” a la tesis de la continuidad. Según él, sin la ayuda adicional de una naturaleza a la vez catalizadora y energética, el “caldo prebiótico” hubiera permanecido estéril. Aquí es donde se vuelve esencial el enlace tioéster.¹⁵⁹ ¿Qué hacen los tioésteres, pues? Su primera función, dice De Duve, consistió en sustentar el ensamblaje de multímeros, sobre todo a partir de aminoácidos, con la ayuda de la energía derivada del enlace tioéster. El proceso de multimerización, aunque aleatorio y no dirigido, produjo una minúscula subserie de multímeros sobrevivientes, entre los que se encontraba un número de catalizadores simples.¹⁶⁰ De Duve describe muchas otras funciones del enlace tioéster, así como sus consecuencias en la posibilidad de establecer una “red protometabólica”. “Habiendo inaugurado la transferencia de electrones, la fosforilación, la transferencia de grupos y el acoplamiento de energía, todo gracias al enlace tioéster, *ahora el protometabolismo podía explotar todo el potencial catalítico de la población de multímeros*”.¹⁶¹ Tras las etapas de la formación del AMP y otros mononucleótidos, de la aparición del ATP, de la transferencia de adenilil, de la generación de coenzimas, finalmente se ensamblaron los primeros oligonucleótidos. “La vida emergente había llegado al umbral del mundo del ARN.”¹⁶²

Una aclaración adicional subrayará la alianza De Duve con la tesis de la continuidad. De Duve hace hincapié en que el aspecto determinista de su modelo no se relaciona con la cuestión de cuán probables son en el universo las condiciones

¹⁵⁷ C. de Duve, *op. cit.*, p. 112.

¹⁵⁸ *Ibid.*, pp. 112-113.

¹⁵⁹ *Ibid.*, p. 113.

¹⁶⁰ *Ibid.*, pp. 113-114.

¹⁶¹ *Ibid.*, p. 115. Las cursivas son mías.

¹⁶² *Idem.*

que “generan la vida”. Se relaciona más bien con la *probabilidad del resultado de estas condiciones* —con el hecho de que las diferentes etapas del proceso, *una vez que éste tiene lugar*, se determinan por las propiedades intrínsecas de las sustancias involucradas—. ¹⁶³ La aleatoriedad en este proceso, que sólo implica la no información, no es una aleatoriedad estadística. Cuando De Duve habla de la “multimerización aleatoria” de pequeños péptidos a partir de aminoácidos, él no da a entender que la composición de la mezcla resultante sea una simple función estadística de las cantidades relativamente abundantes de los diferentes elementos constitutivos. Más bien, diferentes constricciones físicas y químicas entran en acción y producen *un fuerte control determinista* de la composición de la población de los péptidos sintetizados y preservados. ¹⁶⁴ Resumiendo los elementos claves de su modelo, De Duve afirma que algunos de los elementos —la construcción de los elementos constitutivos básicos mediante la síntesis abiótica, la formación de multímeros catalíticos mediante el ensamblaje aleatorio (no dirigido) de tales elementos constitutivos, la formación de tioésteres— se logran “sólo explotando totalmente la aleatoriedad y no dejándole nada al azar”. ¹⁶⁵ Únicamente cuando los puntos principales del plano se hubieran cumplido, continúa diciendo De Duve, “la complejidad alcanzaría el nivel suficiente para que el azar empezara a desempeñar un papel y aportara la diversidad y la imprevisibilidad”. ¹⁶⁶

Así, el modelo de De Duve es una expresión específica de su afirmación general de que “si no fuera [la emergencia de la vida] una manifestación obligatoria de las propiedades combinatorias de la materia, no hubiera podido aparecer naturalmente”. ¹⁶⁷ ¿Puede describirse tal posición como “predestinística”, para utilizar el término acuñado por Robert Shapiro en una crítica que engloba todos los actuales modelos del origen de la vida? Según Shapiro, los teóricos de la replicación primordial, tanto como los de la célula primordial, son “predestinistas” que creen “que las leyes del universo contienen un prejuicio integrado que favorece la producción de las sustancias químicas que son vitales en la bioquímica y finalmente en la vida humana”. ¹⁶⁸ Shapiro impugna los esfuerzos “predestinistas” es-

¹⁶³ *Ibid.*, p. 214.

¹⁶⁴ *Ibid.*, pp. 141-143.

¹⁶⁵ *Ibid.*, p. 213.

¹⁶⁶ *Idem.* S. J. Gould hace la distinción entre la naturaleza estrictamente determinista de la fase del origen de la vida y la naturaleza totalmente contingente de la sucesiva evolución biológica, y considera que el origen de la vida en la Tierra fue “virtualmente inevitable, dada la composición química de los océanos y las atmósferas primigenios y los principios físicos de los sistemas autoorganizados” (S. J. Gould, *op. cit.*, p. 289).

¹⁶⁷ C. de Duve, *op. cit.*, p. 217.

¹⁶⁸ R. Shapiro, *op. cit.*, p. 108.

pecíficos de los “químicos prebióticos por inventar series de reacciones verosímiles” que demuestren cómo la química se transformó en bioquímica dentro de cierto escenario.¹⁶⁹ Desde mi punto de vista, y como conclusión de este capítulo, diré que lo que Shapiro describe y condena es nada menos que la receta para la investigación científica de la emergencia de la vida. Con base en la tesis de la continuidad, entendida como la alternativa racional adoptada por la ciencia frente a la alternativa del milagro o el diseño divino, se pueden concebir diversos modelos para dirigir la indagación experimental o teórica específica.

CONCLUSIÓN

He dedicado este capítulo a la discusión de la “tesis de la continuidad”, así llamada por mí. Esta tesis afirma que el desarrollo de la vida a partir de la materia es un proceso gradual que se puede explicar sobre la base de principios físicos. La tesis rechaza la idea del “campo del azar” que diversos científicos han propuesto, la cual dice que sobre el abismo entre la materia inanimada y la vida se tendió un suceso único, milagroso. He descrito la tesis de la continuidad como una presuposición filosófica que une a los investigadores del origen de la vida y que crea el fundamento del “campo de la ley”. Tras examinar diversos modelos propuestos en el campo del origen de la vida, por ejemplo, las teorías de la replicación primordial y de la célula primordial, pude señalar en todos ellos, a pesar de sus diferencias, la presencia de la tesis de la continuidad. La suposición de que la vida emergió de la materia basándose en mecanismos físicos de autoorganización, no es un “ingrediente pasivo” en todas estas teorías. Una vez que se acepta, tal suposición puede servir como una guía para concebir modelos más probables. Esto lo ejemplifiqué con el trabajo de Christian de Duve.

Con frecuencia los científicos tienden a negar cualquier tipo de pertinencia que puedan tener las consideraciones filosóficas para sus trabajos. El análisis desarrollado en este trabajo muestra que es innegable la importancia de las suposiciones y argumentos filosóficos en el campo de la emergencia de la vida. La filosofía, en este caso, revela el meollo, el “derecho a existir” mismo, de esta empresa científica.

¹⁶⁹ *Ibid.*, p. 176.

BIBLIOGRAFÍA

- Bartel, D. P., y J. W. Szostak, "Isolation of New Ribozymes from a Large Pool of Random Sequences", *Science*, 261: 1411-1418, 1993.
- Bernal, J. D., "Discussion", en S. W. Fox (comp.), *The Origin of Prebiological Systems and their Molecular Matrices*, Academic Press, Nueva York, 1965, pp. 65-88.
- Bresch, C., H. Neisert y D. Harnasch, "Hypercycles, Parasites and Packages", *Journal of Theoretical Biology*, 85: 399-405, 1980.
- Cairns-Smith, A. G., *Seven Clues to the Origin of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- Crick, F., *Life Itself*, Simon and Schuster, Nueva York, 1981. [Versión en español: *La vida misma. Su origen y naturaleza*, trad. de P. Torres Aguilar, Fondo de Cultura Económica, México, 1985.]
- Crick, F., y L. E. Orgel, "Directed Panspermia", *Icarus*, 19: 341-346, 1973.
- Dawkins, R., *The Blind Watchmaker*, Penguin, Londres, 1986. [Versión en español: *El relojero ciego*, trad. de M. Arroyo Fernández, RBA, Barcelona, 1993.]
- , *The Selfish Gene*, Oxford University Press, 1976. [Versión en español: *El gen egoísta. Las bases biológicas de nuestra conducta*, trad. de J. Robles Suárez, Salvat, Barcelona, 1993.]
- Depew, D. J., y B. H. Weber, "Consequences of Nonequilibrium Thermodynamics for the Darwinian Tradition", en B. H. Weber, D. J. Depew y J. D. Smith (comps.), *Entropy, Information, and Evolution*, MIT Press, Cambridge, 1988, pp. 317-354.
- Duve, C. de, *Blueprint for a Cell*, Neil Patterson, Burlington, 1991.
- Dyson, F., *Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- Eigen, M., *Steps towards Life*, Oxford University Press, Oxford, 1992.
- , "Viral Quasispecies", *Scientific American*, 269: 42-49, 1993.
- , "Self-organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules", *Naturwissenschaften*, 58: 465-523, 1971.
- Eigen, M., W. Gardiner, P. Schuster y R. Winkler-Oswatitsch, "The Origin of Genetic Information", *Scientific American*, 244 (4): 88-92, 1981.
- Eigen, M., y P. Schuster, "The Hypercycle, part A: The Emergence of the Hypercycle", *Naturwissenschaften*, 64: 541-565, 1977.
- , "The Hypercycle, part C: The Realistic of the Hypercycle", *Naturwissenschaften*, 65: 341-369, 1978.
- Farley, J., *The Spontaneous Generation Controversy from Descartes to Oparin*, Baltimore, 1974.

- Fox, S. W., "Life from an Ordenaly Cosmos", *Naturwissenschaften*, 67: 576-581, 1980.
- , "Proteinoid Experiments and Evolutionary Theory", en M. W. Ho y P. T. Saunders (comps.), *Beyond Neo-Darwinism*, Academic Press, Londres, 1984.
- Fox, S. W., y K. Dose, *Molecular Evolution and the Origin of Life*, W. H. Publishers, San Francisco, 1972.
- Gesteland, R. F., y J. F. Atkins (comps.), *The RNA World*, Cold Spring Harbor Press, Nueva York, 1993.
- Goldanskii, V. L., y V. V. Kuzmin, "Spontaneous Breaking of Mirror Symmetry in Nature and the Origin of Life", *Soviet Physics Uspekhi*, 32: 1-29, 1989.
- Gould, S. J., *Wonderful Life*, W. W. Norton, Nueva York, 1989. [Versión en español: *La vida maravillosa*, Crítica, Madrid, 2010.]
- Gribbin, J., *In the Beginning*, Little, Brown and Company, Boston, 1993.
- Haldane, J. B. S., *Mechanism, Life and Personality*, John Murray, Londres, 1921.
- , "The Origins of Life", en J. D. Bernal, *The Origin of Life*, Wiedenfeld y Nicholson, Londres, 1967, pp. 242-249.
- Hoyle F., y N. C. Wickramasinghe, *Evolution from Space*, J. M. Dent, Londres, 1981. [Versión en español: *La evolución de la vida desde el espacio exterior*, trad. de A. Bárcena, Fondo de Cultura Económica, México, 1992.]
- , *Our Place in the Cosmos*, J. M. Dent, Londres, 1993.
- Hull, D. L., "Introduction", en B. H. Weber, D. J. P. Depew y J. D. Smith (comps.), *Entropy, Information and Evolution*, MIT Press, Cambridge, 1988, pp. 1-8.
- Joyce, G. F., "RNA Evolution and the Origin Life", *Nature*, 338: 217-224, 1989.
- Kamminga, H., "Life from Space —A History of Panspermia", *Vistas in Astronomy*, 267: 67-86, 1982.
- , "The Protoplasm and the Gene", en A. G. Cairns-Smith y H. Hartman (comps.), *Clay Minerals and the Origin of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986. pp. 1-9.
- Kant, I., *Critique of Judgment*, trad. de W. S. Pluhar, Hackett, Indianápolis, 1987. [Versión en español: *Crítica del juicio*, 8ª ed., trad. de M. García Morente, Espasa-Calpe, Madrid, 1999.]
- Kauffman, S. A., "Antichaos and Adaptation", *Scientific American*, 265 (2): 78-84, 1991.
- , *The Origins of Order: Self-organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, Oxford, 1993.
- Keosian, J., "Life's Beginnings-Origin or Evolution", *Origins of Life*, 5: 285-293, 1974.
- Kimura, M., *The Neutral Theory of Molecular Evolution*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983.
- Küppers, B.-O., *Information and the Origin of Life*, MIT Press, Cambridge, 1990.
- Lehninger, A. L., *Biochemistry*, Worth, Nueva York, 1970.

- Maynard Smith, J., *The Problems of Biology*, Oxford University Press, Oxford, 1986. [Versión en español: *Los problemas de la biología*, Cátedra, Madrid, 1987.]
- Mayr, E., "Teological and Teolomic, a New Analysis", *Boston Studies in the Philosophy of Science*, 14: 91-117, 1974.
- , *The Growth of Biological Thought*, Harvard University Press, Cambridge, 1982.
- Monod, J., *Chance and Necessity*, Collins Publishing, Fontana Books, Glasgow, 1974. [Versión en español: *El azar y la necesidad. Ensayo sobre la filosofía natural de la biología moderna*, Tusquets, Barcelona, 1981.]
- Mora, P. T., "The Folly of Probability", en S. W. Fox (comp.), *The Origin of Prebiological Systems and of their Molecular Matrices*, Academic Press, Nueva York, 1965, pp. 39-52.
- Morowitz, H. J., *Beginnings of Cellular Life*, Yale University Press, Haven, 1992.
- Oparin, A. I., "Forward", en S. W. Fox y K. Dose, *Molecular Evolution*, W. H. Freeman, San Francisco, 1972.
- , *Genesis and Evolutionary Development of Life*, trad. de E. Maas, Academic Press, Nueva York, 1967.
- , *The Origin of Life*, trad. de S. Morgolis, Macmillan, Nueva York, 1961. [Versión en español: *El origen de la vida*, trad. de D. Orozco, Grijalbo, México, 1968.]
- Orgel, L. E., "Evolution of the Genetic Apparatus", *Journal of Molecular Biology*, 38: 381-393, 1968.
- Popper, K., "Scientific Reduction and the Essential Incompleteness of All Science", en F. J. Ayala y T. Dobzhansky (comps.), *Studies in the Philosophy of Biology. Reduction and Related Problems*, University of California Press, Berkeley, 1974, pp. 259-284.
- , *The Open Universe: An Argument for Indeterminism*, Rowman y Littlefield, Totowa, 1982.
- Rood, R. T., y J. S. Trefil, *Are We Alone?*, Charles Scribner's Sons, Nueva York, 1981.
- Shapiro, R., *Origins*, Bantam Books, Toronto, 1986.
- Toulmin, S., y J. Goodfield, *The Architecture of Matter*, The University of Chicago Press, Chicago, 1982.
- Waldrop, M. M., "Spontaneous Order, Evolution and Life", *Science*, 247:1543-1545, 1990.
- Waldrop, M. M., D. J. Depew y J. D. Smith (comps.), *Entropy, Information, and Evolution*, MIT Press, Cambridge, 1988.
- Weber, B. H., D. J. Depew, C. Dyke, S. N. Salthe, E. D. Schneider, R. U. Ulanowicz y J. Wicken, "Evolution in Thermodynamic Perspective: An Ecological Approach", *Biology and Philosophy*, 4: 373-406, 1989.
- Weiner, A. M., y N. Maizels, "The Genomic Tag Model for the Origin of Protein Synthesis", en S. Osawa y T. Honjo (comps.), *Evolution Life*, Springer, Tokio, 1991, pp. 51-65.
- Wicken, J., *Evolution, Thermodynamics and Information*, Stanford University Press, Nueva York, 1987.

Norman R. Pace*

XI. LA NATURALEZA UNIVERSAL DE LA BIOQUÍMICA**

DESDE HACE mucho tiempo la gente ha especulado sobre la posibilidad de la existencia de la vida en otros escenarios, además del terráqueo. Sin embargo, sólo desde hace unos cuantos siglos hemos podido concebir la naturaleza específica de tales escenarios: otros planetas en torno a nuestro propio Sol y sistemas solares similares al nuestro en otros lugares del universo físico. La especulación sobre la naturaleza de la vida fuera de la Tierra con frecuencia ha hecho poco caso de las constricciones impuestas por la naturaleza de la bioquímica. Un siglo de fantástica ciencia ficción no sólo ha producido el entusiasmo social respecto a la búsqueda de la vida extraterráquea, sino también fantasiosas nociones sobre las formas químicas y físicas que la vida puede asumir, sobre lo que puede ser la naturaleza de la vida. Desde la época de la expedición Viking a Marte, a mediados del decenio de 1970, nuestro concepto de la diversidad de la vida en la Tierra se ha ampliado significativamente, y ahora tenemos una mejor idea de las condiciones extremas que restringen la vida. En consecuencia, nuestra búsqueda de la vida en otros lugares del Sistema Solar hoy se puede llevar a cabo con una perspectiva más amplia que anteriormente.

¿Cómo sería posible detectar la vida, independientemente de su naturaleza y origen? En vista de los recientes avances espectaculares en la astronomía empírica, parece probable que el primer signo de la vida en otros lugares será la detección espectroscópica de gases coexistentes no equilibrados, por ejemplo, el oxígeno y el metano en la atmósfera de un planeta que gira en torno a una lejana estrella. La coexistencia de tales gases indicaría que se reabastecen, hecho que

* El National Institute of Health [Instituto Nacional de la Salud], la National Science Foundation [Fundación Nacional de la Ciencia] y el National Aeronautics and Space Administration Astrobiology Institute [Instituto de Astrobiología y de Administración del Espacio y de la Aeronáutica Nacional] proporcionan un apoyo a mis trabajos de investigación.

** Este capítulo apareció originalmente en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98 (3): 805-808, 2001. © 2001, National Academy of Sciences, U. S. A. PNAS no es responsable por la exactitud de esta traducción.

acaso se podría explicar de inmediato por la influencia de la vida.¹ Mediante la observación del oxígeno y el metano, incluso la Tierra se podría ver como un ámbito para la vida desde lejanas galaxias. Otros hábitats potenciales para la vida en este Sistema Solar, tales como Marte y Europa, no son tan obvios. La búsqueda de la vida en estos cuerpos se habrá de realizar en el nivel de la química analítica. Empezar la detección de la vida extraterrestre nos ayudará a ponerle límites a lo que podría ser la naturaleza de la vida. Estos límites —los requisitos de la vida— nos indican dónde y cómo buscar la vida, así como las formas que ésta pueda asumir.

¿QUÉ ES LA VIDA?

La pregunta inicial que es necesario afrontar, pregunta que en último análisis requiere una definición, es “¿qué es la vida?” La mayoría de los biólogos estarían de acuerdo en que la autorreplicación, la continuidad genética, es un aspecto fundamental del proceso de la vida. Hay sistemas que generalmente se piensa que no son biológicos y que sin embargo pueden manifestar cierto tipo de autorreplicación.² Algunos ejemplos serían una celosía de cristal que crece o una estructura de arcilla que se propaga. Los cristales y las arcillas se propagan, sin duda alguna, pero no son ejemplos de vida. No son un centro de continuidad genética, un organismo. Tales sistemas no evolucionan, no cambian de manera genética para enfrentar nuevos retos. En consecuencia, la definición de la vida tiene que incluir la capacidad de la evolución, tanto como la de la autorreplicación. Efectivamente, el mecanismo de la evolución —la selección natural— es una consecuencia de los impulsos necesariamente competitivos en aras de la autorreplicación que se presentan en todos los organismos. Una definición basada en estos procesos, por lo tanto, sería que la vida es un sistema que tiene la capacidad de la autorreplicación y que evoluciona.

Los procesos de la autorreplicación y de la evolución no son inconfundiblemente detectables, incluso en el escenario terrestre. Por ende, en nuestra búsqueda práctica de la vida en otros lugares tenemos que incorporar la información sobre la naturaleza de los procesos químicos que proporcionan las bases de la

¹ Committee on Planetary and Lunar Exploration, Space Studies Board, Commission on Physical Sciences, Mathematics and Applications, y National Research Council, *Strategy for the Detection and Study of Other Planetary Systems and Extrasolar Planetary Materials: 1990-2000*, National Academy Press, Washington, 1990.

² G. Feinberg y R. Shapiro, “Life beyond Earth: The Intelligent Earthling’s Guide to Life in the Universe”, Morrow, Nueva York, 1990.

autorreplicación y la evolución. En vista de las propiedades de las moléculas que se requieren para la replicación y la evolución, es predecible que la vida que encontremos en cualquier parte del universo estará compuesta de sustancias químicas orgánicas que como las sustancias orgánicas de nuestra propia vida terráquea obedecen a los mismos principios generales. La definición funcional de la vida entonces se convierte en: la vida es un sistema autorreplicador y evolutivo que se basa probablemente en la química orgánica.

¿POR QUÉ LA QUÍMICA ORGÁNICA?

El impulso fundamental de la vida consiste en hacer más de sí misma. Las reacciones químicas necesarias para la propagación fidedigna de un organismo viviente e independiente necesariamente requieren un alto grado de especificidad en las interacciones de las moléculas que llevan a cabo la propagación. Tal especificidad requiere información, en la forma de una estructura molecular compleja: moléculas grandes. Las moléculas de los organismos terráqueos son típicamente muy grandes, proteínas y ácidos ribonucleicos con pesos moleculares de miles a millones de daltons, o incluso todavía más grandes, como el ADN genético. Es predecible que la vida, dondequiera que la encontremos, estará compuesta de macromoléculas.

Se sabe que tan sólo dos de los átomos naturales, el carbono y el silicio, pueden servir como columnas vertebrales de moléculas lo suficientemente grandes como para almacenar la información biológica. Las investigaciones de la química de la vida se han enfocado por lo general únicamente en el carbono.³ Siendo el carbono la base estructural de la vida, uno de sus aspectos importantes es que puede, a diferencia del silicio, involucrarse fácilmente en la formación de enlaces químicos con otros átomos, permitiendo así la versatilidad química que es necesaria para la realización de las reacciones del metabolismo biológico y de la propagación. Los diversos grupos orgánicos funcionales, compuestos de hidrógeno, oxígeno, nitrógeno, fósforo, sulfuro, y varios metales como el hierro, el magnesio y el zinc, proporcionan la enorme diversidad de reacciones químicas que los organismos vivientes necesariamente catalizan. Pero el silicio interactúa con sólo unos cuantos átomos, y las moléculas grandes de silicio son monótonas en comparación con el universo combinatorio de las macromoléculas orgánicas.

³ S. L. Millers *et al.*, *The Origins of Life on Earth*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1974.

La vida también tiene que captar energía y transformar esa energía a fin de utilizarla en la química de la replicación. Las propiedades electrónicas del carbono, a diferencia de las del silicio, consienten la formación de dobles e incluso triples enlaces con otros átomos. Estos enlaces químicos permiten la captura y la deslocalización de la energía electrónica. Por lo tanto, algunos compuestos que contienen carbono pueden polarizarse en alto grado, lo que les permite captar “energía de resonancia” y luego utilizar esta energía química para la realización de tareas o la producción catalítica de nuevas sustancias químicas. El potencial de polarización de los compuestos orgánicos también contribuye a la especificidad de las interacciones moleculares, ya que las complementariedades iónicas y las complementariedades de las fuerzas de Van der Waals pueden cambiar a fin de enlazarse o repelerse entre sí. Finalmente, es de crucial importancia que las reacciones orgánicas, a diferencia de las reacciones basadas en el silicio, aceptan ampliamente las condiciones acuosas. Varias de sus propiedades indican que el agua es probablemente el hábitat de la vida en cualquier parte del universo.⁴

La probabilidad de que la vida en el universo se base en el carbono se respalda por el hecho de que el carbono es uno de los elementos superiores más abundantes. Las investigaciones astronómicas han encontrado compuestos orgánicos complejos regados a lo largo del espacio interestelar. Además, los comunes meteoritos carbonáceos atestiguan el origen rico en carbono de nuestro propio Sistema Solar. Si la vida depende de las propiedades del carbono, entonces se puede esperar que la vida sólo ocurra en asociación con estrellas de segunda generación o más. La razón es que el carbono sólo se forma, hasta donde sabemos, en el corazón de las estrellas extinguidas.

LA NATURALEZA UNIVERSAL DE LA BIOQUÍMICA

La vida conocida construye moléculas orgánicas simples que se utilizan como elementos constitutivos en las moléculas grandes. Los aminoácidos se emplean para construir largas cadenas de proteínas; los azúcares sencillos se combinan con las bases de purina y pirimidina y con el fosfato para construir los ácidos nucleicos. Sería lógico que la evolución de cualquier forma de vida basada en sustancias orgánicas también diera como resultado la construcción de moléculas

⁴ G. Feinberg y R. Shapiro, *op. cit.*

complejas, estructuras repetidas de subunidades simples. De hecho, es probable que los elementos constitutivos básicos de la vida, dondequiera que ésta se encuentre, sean similares a los nuestros, si no en lo particular, en lo general. Así, los 20 aminoácidos comunes son las más sencillas estructuras de carbono imaginables que puedan generar los grupos funcionales utilizados en la vida, con propiedades tales como la estructura repetitiva (la unidad peptídica), la reactividad con el agua, y la quiralidad intrínseca. Además, los aminoácidos se forman fácilmente a partir de compuestos orgánicos simples y aparecen en cuerpos extraterrestres como los meteoritos, de manera que probablemente se puedan formar en cualquier escenario donde llegue a desarrollarse la complejidad química que es necesaria para la vida.

De manera similar, los azúcares de cinco carbonos que se utilizan en los ácidos nucleicos probablemente constituyan un caso repetido en esos escenarios, en parte porque son los azúcares más pequeños que pueden formar anillos para orientar espacialmente a otras moléculas; por ejemplo las purinas y las pirimidinas que contienen la información genética de los organismos terrestres. Además, a causa de la capacidad única que tienen las purinas y las pirimidinas para interactuar entre sí con particular especificidad, también estas subunidades, o algo a ellas muy parecido, probablemente son comunes en la vida dondequiera que ésta ocurra. Las diferencias de los sistemas evolutivos probablemente se darán en los niveles superiores: las estructuras de las macromoléculas ensambladas con unidades simples y los mecanismos mediante los cuales se ensamblan y en los cuales participan.

Las similitudes que probablemente son comunes en la vida dondequiera que se encuentre van más allá de los elementos constitutivos. La transformación de la energía es un asunto crucial. Los procesos de la vida requieren la captación, mediante procedimientos físicos o químicos, de una cantidad adecuada de energía a fin de llevar a cabo las transformaciones químicas necesarias para la vida. Con base en la termodinámica, sólo existen dos procedimientos para captar energía que puedan sustentar la “productividad primaria”, la síntesis de sustancias biológicas a partir del dióxido de carbono inorgánico. Uno de los procedimientos, llamado litotrofia, implica la oxidación y concomitante reducción de compuestos geoquímicos. Por ejemplo, los organismos metanogénicos adquieren energía para el crecimiento mediante la utilización de hidrógeno (H_2) como fuente de electrones de alta energía que se transfieren al dióxido de carbono (CO_2), formando metano (CH_4). Otros microbios podrían usar sulfuro de hidrógeno (H_2S) como fuente de energía, y metabolizarse con oxígeno (O_2) para producir ácido sulfúrico.

co (H_2SO_4). Se cree que la vida primigenia en la Tierra estaba basada en un metabolismo litotrófico.

El segundo procedimiento general para obtener energía, la fotosíntesis, capta la energía de la luz y la convierte en electrones energéticos que se pueden usar para realizar tareas bioquímicas. La fotosíntesis surgió a principios de la historia de la vida terráquea y hoy probablemente impulsa la mayor parte de la productividad primaria en la Tierra. Se desconoce la contribución de la litotrofia a la productividad primaria terráquea, ya que actualmente existe poca información sobre los organismos de este tipo que puedan estar distribuidos a lo largo de la corteza de la Tierra, dondequiera que las condiciones físicas lo permitan.

Aunque se supone que la vida terráquea y la vida que haya podido surgir independientemente de la Tierra utilizarían muchos elementos constitutivos similares, si no idénticos, también se supone que poseerían cualidades bioquímicas singulares. Esta suposición se basa en el hecho de que las diferentes líneas evolutivas de la evolución terráquea también han engendrado características nuevas que son de su exclusividad. Así, la bioquímica de la metanogénesis surgió únicamente en el dominio filogenético de las arqueas, mientras que la propiedad de la fotosíntesis basada en la clorofila surgió en el dominio de las bacterias. El citoesqueleto, probablemente necesario en las estructuras celulares grandes y complejas, surgió entre los eucariotas. En vista de la diversidad de la vida en la Tierra, debemos suponer que las características nuevas, tanto como las características comunes, también se dan en otros escenarios.

LOS LÍMITES FÍSICOS DE LA VIDA:

LA ZONA HABITABLE

Las conjeturas sobre los lugares del Sistema Solar adonde podría surgir la vida se limitaban históricamente al convencimiento de que la vida depende a final de cuentas de la luz y el calor del Sol, y que por lo tanto la vida sólo podría existir en la superficie de los planetas. Se pensaba que la frontera interna de la “zona habitable” de nuestro Sistema Solar se hallaba aproximadamente entre la Tierra y Venus, no tan cerca del Sol como para que esta zona fuera demasiado caliente para la vida. Se creía que la frontera externa se hallaba entre Marte y Júpiter, no tan lejos del Sol como para que la superficie de un cuerpo necesariamente se congelara o no recibiera la suficiente luz para una fotosíntesis eficaz. Sin embargo, probablemente no se requiera la luz para que la vida surja, salvo que se involucre en la

formación de compuestos orgánicos durante la acreción de un sistema planetario. Por otra parte, es posible que la utilización biológica de la energía de la luz, la fotosíntesis, sea un prerequisite de la persistencia de la vida planetaria a lo largo de miles de millones de años. La razón de esta conjetura es que la luz proporciona una fuente de energía continua y relativamente inagotable. La vida que sólo dependa de la energía química inevitablemente decaerá al irse agotando los recursos sin renovarse.

No obstante, sabemos que la vida existe en la corteza de la Tierra, lejos de la influencia directa de la luz, y que muchos organismos tienen un metabolismo que funciona independientemente de la luz. Por lo tanto, la frontera externa de la zona potencialmente habitable se extiende hasta los lugares más lejanos del Sistema Solar, hasta cualquier cuerpo rocoso con calefacción interna, sin importar su distancia del Sol. (Específico cuerpo “rocoso” a fin de indicar el suministro de las sustancias químicas que se consideran necesarias para el metabolismo y que explícito más adelante.) La vida puede mantenerse en ausencia de la luz mediante la utilización de fuentes de energía inorgánicas, tal como lo hacen los organismos litotróficos, o de fuentes orgánicas depositadas en el interior de los planetas durante su acreción, como lo hacen los heterótrofos.⁵ Por lo tanto, en vez de la proximidad al Sol, parecería más útil definir la zona habitable de la vida en relación con las condiciones químicas y físicas que se piensa que son necesarias para la vida. Nuestra idea de las posibles condiciones extremas para la vida actualmente se limita a las condiciones extremas para la vida terráquea. En vista de la intrínseca fragilidad de los sistemas orgánicos complejos, conjugada con la poderosa fuerza de la selección natural, yo me aventuro a decir que es probable que los límites físicos de la vida sean aproximadamente los mismos en cualquier lugar del universo. Sin embargo, es amplio el abanico de escenarios químicos y físicos donde se da la vida. Las siguientes son algunas consideraciones importantes.

El escenario químico

Aunque el requerimiento general de energía de la vida es una condición de desequilibrio químico que permite algún tipo de reacción de oxidación-reducción, las necesidades específicas de las estrategias biológicas de captación de energía limitan los lugares donde puede ocurrir la vida. Por ejemplo, un escenario para

⁵ T. Gold, *The Deep, Hot Biosphere*, Springer, Nueva York, 1998.

los organismos litotróficos requiere la existencia de una mezcla adecuada de sustancias químicas oxidadas y reducidas. Los organismos fotosintéticos requieren suficiente luz de la frecuencia apropiada. La luz debe ser lo suficientemente energética como para sustentar la biosíntesis, pero no tan energética como para ser químicamente destructiva. Estas consideraciones circunscriben la vida basada en la fotosíntesis al margen espectral de 300-1500 nm de longitud de onda. (La fotosíntesis terráquea se limita a 400-1200 nm.) Aparte de los requerimientos de energía para el metabolismo y del CO₂ como fuente de carbono, la vida terráquea sólo requiere unos cuantos elementos: H, N, P, O, S, y la serie de los metales.

El escenario físico

Las restricciones físicas de la vida consisten en la temperatura, la presión y el volumen. La enorme diversidad de la vida terráquea probablemente proporciona una analogía de la diversidad de la vida en otros lugares.

La temperatura es un factor crítico para la vida. Las temperaturas deben ser lo suficientemente altas como para que las reacciones puedan ocurrir, pero no tan altas que destruyan las complejas y relativamente frágiles biomoléculas. Además, ya que la vida depende universalmente del agua, la temperatura debe estar en el rango adecuado para que el agua tenga las propiedades necesarias para la transferencia de solutos. Se puede estabilizar el agua mediante la presión para impedir el hervor, pero a temperaturas demasiado bajas el agua se vuelve cristalina y no favorece la transferencia. Actualmente, el récord de alta temperatura para microbios cultivables es de 112-113 °C, en el caso de los arqueanos hipertermófilos de los géneros *Pyrolobus* y *Pyrodicticum*.⁶ Incluso la espectacularmente resistente endospora bacteriana no sobrevive a un calentamiento sostenido de más de 120 °C. La frontera de la temperatura más baja que pueda resistir la vida aún no se ha establecido, pero los microbios resisten el hielo y se ha descubierto que hay organismos que pueden crecer en el hielo, soportando temperaturas de hasta -20 °C.⁷ Las propiedades físicas del hielo permiten la difusión de solutos a temperaturas mucho más bajas que la del punto de congelamiento.⁸ Así, con base en la

⁶ E. Stetter, "Extremophiles and their Adaptation to Hot Environments", *FEBS Letter*, 452: 22-25, 1999.

⁷ E. M. Rivkina *et al.*, "Metabolic Activity of Permafrost Bacteria below the Freezing Point", *Applied and Environmental Microbiology*, 66: 3230-3233, 2000.

⁸ B. P. Price, "A Habitat for Psychrophiles in Deep Antarctic Ice", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97: 1247-1251, 2000.

química orgánica acuosa, el rango de la temperatura para la vida en el universo probablemente se ubica a una temperatura de menos de 200 °C, entre -50 °C y 150 °C.

La presión y el volumen

La presión necesaria en un escenario de vida probablemente sólo se restringe en el extremo inferior por la presión de vapor necesaria para mantener el agua o el hielo. Se desconoce el límite superior de la tolerancia de la presión. Los organismos en el suelo oceánico terráqueo experimentan una presión de más de 1 000 atmósferas, y los microbios recuperados en los pozos de petróleo profundos soportan presiones mucho más altas. El límite superior de la presión que pueda soportar la vida probablemente se determina por el efecto de la presión en la reducción del volumen corporal. Sin embargo, la vida puede ser extraordinariamente pequeña. Se ha calculado que las células con un diámetro de sólo unos cuantos cientos de nanómetros pueden contener todos los componentes que se consideran necesarios para la vida.⁹

La suposición de la generalidad de la química en los procesos de la vida es una ayuda en la detección de la vida porque permite predecir que los tipos terráqueos de las sustancias bioquímicas pueden ser blancos útiles de análisis incluso en un escenario extraterráqueo. Por otra parte, la esperada similitud de la vida terráquea y la vida potencialmente alienígena complica la interpretación de las pruebas químicas positivas relacionadas con las muestras bioquímicas. Así, el análisis de compuestos bioquímicos simples semejantes a los terráqueos podría no distinguir entre una señal de vida y una sustancia química derivada abióticamente, o entre una forma de vida alienígena y una sustancia contaminante terráquea. La distinción entre organismos con un distinto origen evolutivo podría requerir el análisis de las macromoléculas y los genes. Serían particularmente reveladores la naturaleza y los detalles de la información genética.

LA FIRMA GENÉTICA DE LA VIDA TERRÁQUEA

Toda la vida en la Tierra se relaciona genéticamente con un pasado evolutivo que se remonta a más de 3 800 millones de años. Vemos esta relación en los mu-

⁹ Commission on Physical Sciences, Mathematics and Applications, y Space Studies Board, *Size Limits of very Small Microorganisms: Proceedings of a Workshop*, National Academy Press, Washington, 1999.

chos rasgos comunes estructurales y mecánicos que se integran en todas las células. Las interrelaciones entre las diferentes formas de vida terráneas se hacen cuantitativamente explícitas en los mapas del curso de la evolución que hoy se están elaborando, árboles filogenéticos basados en secuencias de ADN. Así que incluso si los potenciales organismos alienígenas hubieran presentado la misma bioquímica que existe en los organismos terráneos, las secuencias genéticas podrían proporcionar los criterios para identificarlos si su origen evolutivo fuera diferente.

El diseño general, basado en secuencias genéticas de la diversidad biológica terránea, se incorpora en los árboles filogenéticos, diagramas de las interrelaciones como el que aparece en la figura XI.1.¹⁰ La construcción de un árbol filogenético es conceptualmente sencilla. El número de diferencias en los pares de secuencias correspondientes a organismos distintos se considera como una medida de la “distancia evolutiva” que los separa. Estas diferencias en los pares de secuencias de muchos organismos pueden utilizarse para deducir mapas de las vías evolutivas que condujeron hasta las secuencias modernas actuales. El árbol filogenético de la figura XI.1 se basa en secuencias genéticas de subunidades pequeñas de ARN ribosomal (ARNr), pero se obtiene la misma topología a partir de la comparación de las secuencias de cualquier tipo de genes implicados en el sistema celular de procesamiento de la información basado en el ácido nucleico, meollo de la continuidad genética. Sin embargo, los árboles filogenéticos basados en los genes metabólicos que intervienen en la manipulación de las moléculas pequeñas y en la interacción con el medio ambiente, a veces no son congruentes con la topología del ARNr. Tales genes no ofrecen una alternativa fiable del árbol del ARNr. Consecuentemente, los esquemas que difieren del árbol del ARNr probablemente se deben interpretar como un reflejo de las transferencias laterales de genes o incluso de las entremezclas de genomas en el curso de la evolución.¹¹ El genoma de cualquier organismo en particular se compone de genes derivados evolutivamente tanto de la transmisión vertical como lateral.

Los árboles filogenéticos son esbozos de la evolución y la diversificación de la vida en la Tierra. Desde el punto de vista de la divergencia como de la complejidad de las secuencias, se considera que la mayor parte de la vida en la Tierra es de naturaleza microbiana, lo cual sin duda es lo que debemos esperar respecto a la vida que pueda existir en otros lugares de nuestro Sistema Solar. Algunas de las

¹⁰ N. R. Pace, “A Molecular View of Microbial Diversity and the Biosphere”, *Science*, 276: 734-740.

¹¹ C. R. Woese, “Interpreting the Universal Phylogenetic Tree”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97: 8392-8396, 2000.

conclusiones que se pueden inferir de los árboles moleculares verifican hipótesis biológicas previamente propuestas. Por ejemplo. Los árboles moleculares confirman lo que alguna vez fue una hipótesis: que los organelos principales, las mitocondrias y los cloroplastos, se derivaron de bacterias, las *proteobacterias* y las *cianobacterias*, respectivamente. El aspecto bioquímico de la fotosíntesis oxigénica surgió con la radiación cianobacteriana (indicada en la figura XI.1 por las líneas que llevan hasta *Synechococcus*, *Gloeobacter* y cloroplasto). Ya que la radiación cianobacteriana es periférica en el árbol, la vida primigenia debió de ser anaeróbica, y la mayor parte de la diversificación bacteriana debió de suceder antes de la disponibilidad del oxígeno.

Otras conclusiones derivadas de los árboles moleculares esclarecen las relaciones entre la vida terráquea. Los árboles moleculares muestran que las líneas principales de la descendencia forman tres grupos de interrelación: los “dominios” de Archaea, Bacteria y Eucarya (las eucariotas). No es posible determinar el punto de origen de las líneas que conducen hasta los dominios modernos utilizando solamente las secuencias de genes de ARNr. Sin embargo, la comparación de las secuencias de familias de genes, tales como los factores Ef-Tu y Ef-G de la síntesis de las proteínas, que divergieron antes del último ancestro común de la vida, indica un origen remoto en la línea bacteriana, como se ve en la figura XI.1. Esta relación significa que las Archaea y los Eucarya compartieron una ascendencia común después de que su ancestro común se separó del dominio de Bacteria. Las propiedades bioquímicas de los organismos respaldan esta conclusión. Por ejemplo, los mecanismos de transcripción y traducción de los actuales representantes de las Archaea y los Eucarya son mucho más parecidos entre sí de lo que cualquiera de ellos a las funciones correspondientes en las bacterias. Este resultado muestra que la línea de descendencia eucariota no es una derivación relativamente reciente de la simbiosis, sino que más bien es tan antigua como la línea de las Archaea. Este resultado también indica que la usual explicación que se da en los libros escolares sobre la división de la vida diciendo que consiste en dos categorías —los procariotas y los eucariotas—, es deficiente. Más bien, la vida terráquea es de tres tipos: la arqueana, la bacteriana y la eucariota, cada una distinta de las otras dos en aspectos fundamentales.

Las secuencias de genes que son comunes en todos los organismos constituyen las firmas indelebles de su origen terráqueo. La razón de tal cosa es que los organismos con un origen distinto con toda probabilidad no hubieran desarrollado secuencias genéticas idénticas, aun cuando fuera idéntica la estructura química de las subunidades que contienen la información genética. Así, en las secuen-

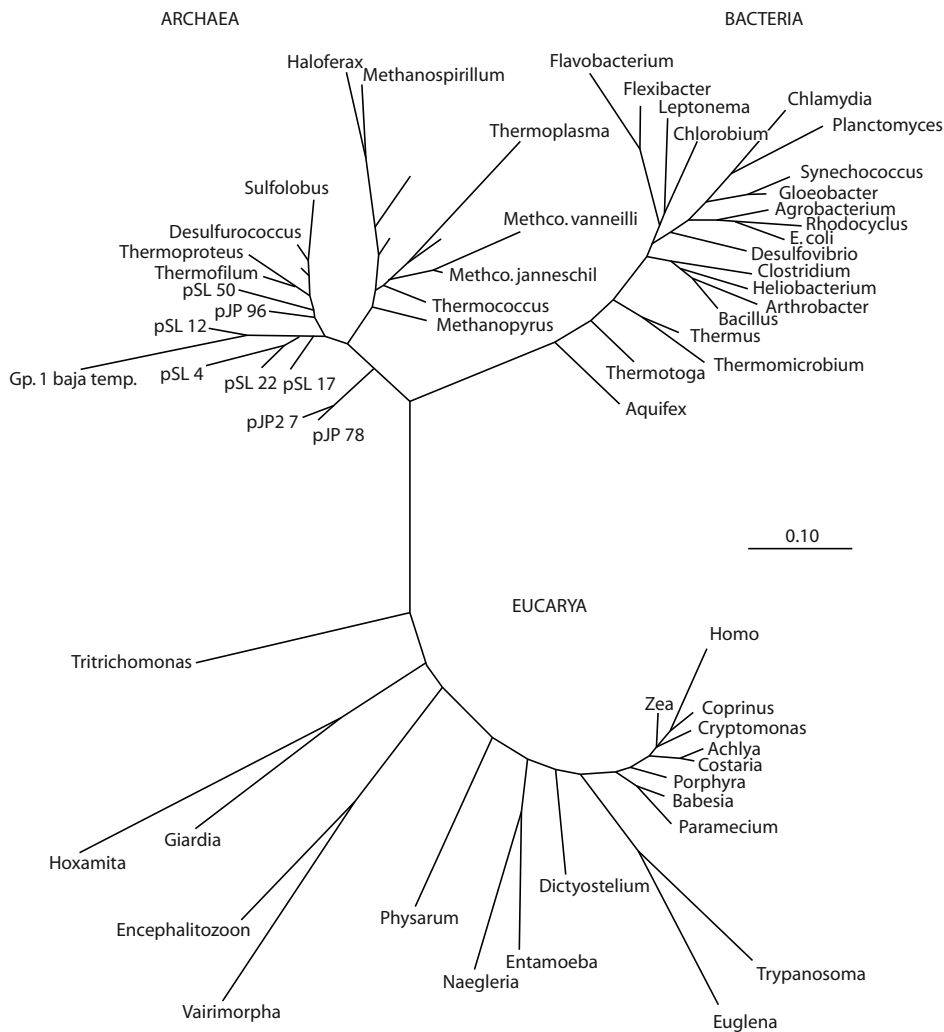


FIGURA XI.1. Árbol filogenético universal basado en secuencias de pequeñas subunidades de ARNr.

Se alinearon 64 secuencias de ARNr representativas de todos los dominios filogenéticos conocidos, y se construyó un árbol utilizando el programa fastDNAmI, que compensa las mutaciones múltiples y las reversibles. Ese árbol se modificó a fin diseñar el que se muestra, recortando los linajes y ajustando los puntos de ramificación a fin de incorporar los resultados de otros análisis. La distancia evolutiva (diferencia en las secuencias) entre las especies representadas se anota en las líneas. La escala corresponde a 0.1 cambios por nucleótido. Imagen tomada de "A Molecular View of Microbial Diversity and the Biosphere", Science, 276: 734-740, 1997. © 1997, American Association for the Advancement of Science.

cias de genes podemos identificar la vida terráquea y podemos diferenciarla de la vida proveniente de un origen evolutivo distinto, incluso si vemos una similitud bioquímica significativa. Este hecho sería importante si la vida —o sus despojos— fuera descubierta en otro cuerpo del Sistema Solar.

Puesto que los sistemas planetarios se forman mediante la acreción, yo creo que es improbable que la vida en otro cuerpo del Sistema Solar haya aparecido independientemente de la vida terráquea. El estudio de los meteoritos ha demostrado que los cuerpos pueden transportarse desde un planeta hasta otro, por ejemplo, desde Marte hasta la Tierra, sin un calentamiento excesivo que pudiera esterilizar a los organismos microbianos.¹² Aunque este tipo de sucesos son hoy raros, debieron de haber sido mucho más frecuentes durante la acreción de los planetas. El bombardeo masivo de materia interestelar a través del Sistema Solar en formación probablemente perduró hasta por lo menos hace 4 000 millones de años, y por lo tanto existía cuando ocurrieron los procesos que dieron origen a la vida. En principio, la vida, haya surgido donde haya surgido, pudo haber sobrevivido la transportación interplanetaria y germinado en los lugares del Sistema Solar donde hubiera las condiciones que permiten la aparición de la vida. Por lo tanto, si cuando vayamos al planeta Marte o a la luna Europa encontramos allí organismos vivientes, no nos deberá sorprender cuando leamos en sus genes de ARNr que sus secuencias se relacionen con las de nuestro propio grupo filogenético, tal como se articulan en el árbol de la vida.

BIBLIOGRAFÍA

- Commission on Physical Sciences, Mathematics and applications, y Space Studies Board, *Size Limits of Very Small Microorganisms: Proceedings of a Workshop*, National Academy Press, Washington, 1999.
- Committee on Planetary and Lunar Exploration, Space Studies Board, Commission on Physical Sciences, Mathematics and Applications y National Research Council, *Strategy for the Detection and Study of Other Planetary Systems and Extrasolar Planetary Materials: 1990-2000*, National Academy Press, Washington, 1990.
- Feinberg, G., y R. Shapiro, *Life beyond Earth: The Intelligent Earthling's Guide to Life in the Universe*, Morrow, Nueva York, 1980.

¹² D. S. McKay *et al.*, "Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenetic Activity in Martian Meteorite ALH84001", *Science*, 273 (5277): 924-930, 1996.

- Gold, T., *The Deep, Hot Biosphere*, Springer, Nueva York, 1998.
- McKay, D. S., E. K. Gibson Jr., K. L. Thomas-Kerpta, H. Vali, C. S. Romanek y R. N. Zare, "Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenetic Activity in Martian Meteorite ALH84001", *Science*, 273 (5277): 924-930, 1996.
- Miller, S. L., y L. E. Orgel, *The Origins of Life on Earth*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1974.
- Pace, N. R., "A Molecular View of Microbial Diversity and the Biosphere", *Science*, 276: 734-740, 1997.
- Price, B. P., "A Habitat for Psychrophiles in Deep Antarctic Ice", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97: 1247-1251, 2000.
- Rivkina, E. M., E. L. Friedmann, C. P. McKay y D. A. Gilichinsky, "Metabolic Activity of Permafrost Bacteria below the Freezing Point", *Applied and Environmental Microbiology*, 66: 3230-3233, 2000.
- Stetter, E., "Extremophyles and their Adaptation to Hot Environments", *FEBS Letters*, 452: 22-25, 1999.
- Woese, C. R., "Interpreting the Universal Phylogenetic Tree", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97: 8392-8396, 2000.

Steven A. Benner, Alonso Ricardo
y Matthew A. Carrigan*

XII. ¿EXISTE UN MODELO QUÍMICO COMÚN DE LA VIDA EN EL UNIVERSO?*

INTRODUCCIÓN

Decir simplemente “No lo sabemos” es con frecuencia la mejor respuesta a ciertas preguntas, acaso también a la pregunta del título de este artículo, propuesta por los editores de este número de *Current Opinion on Chemical Biology* [Ideas Actuales sobre la Biología Química]. Puesto que sólo conocemos directamente la vida en la Tierra, y puesto que la vida conocida en la Tierra ha descendido de un solo ancestro, únicamente podemos extrapolar las afirmaciones sobre la química de la vida al campo de la generalidad partiendo de una sola base factual. No habremos de tener una segunda base de datos hasta que no encontremos la vida en otro lugar o hasta que no nos contacten los alienígenas. Acaso no la tendremos incluso entonces, si la vida extraterrestre y la vida terráquea comparten un ancestro común.

Claro es que podemos concebir soluciones químicas alternativas para los retos específicos que se les presentan a los sistemas vivientes.¹ Luego podemos probar su factibilidad sintetizando en el laboratorio las moléculas orgánicas no naturales que representan las alternativas, y viendo si funcionan adecuadamente. Algunas de las alternativas provienen simplemente de las preguntas “¿Por qué?” o “¿Por qué no?” Por ejemplo: ¿por qué sólo se utilizan los mismos 20 aminoácidos en las proteínas terráqueas? Los experimentos con aminoácidos no naturales (utilizando el ribosoma natural para incorporarlo en las proteínas) han ampliado

* Los autores agradecen el apoyo del programa de exobiología de la NASA (NAG5-12362) y de la National Science Foundation (CHE-0213575).

** Este artículo apareció originalmente en *Current Opinion in Chemical Biology*, 8: 672-689, 2004. © Elsevier, 2004.

¹ W. Bains, “Many Chemestries Could Be Used to Build Living Systems”, *Astrobiology*, 4: 137-167, 2004.

el repertorio de aminoácidos de las proteínas.² En estos experimentos no se encuentra motivo alguno para excluir series alternativas de aminoácidos de las hipotéticas proteínas de las hipotéticas formas de vida alienígenas.

Es posible hacer preguntas similares respecto al ADN. Por ejemplo: ¿por qué utiliza la genética terráquea la ribosa y la desoxirribosa? ¿Por qué no utiliza glicerol, una hexosa o una tetrosa? A partir de todas estas sustancias los químicos sintéticos han podido hacer ADN análogos y han estudiado su comportamiento.³ Estos trabajos son el fundamento de una discusión racional de la etiología y diseño del ADN.

Algunas preguntas van más lejos. ¿Es esencial para la vida un sistema de tres biopolímeros (ADN-ARN-proteínas)? ¿Por qué no dos polímeros solamente, o sólo uno? ¿Es necesaria el agua? ¿Es esencial el carbono? ¿Por qué no el silicio? En estos casos es más difícil crear los experimentos directos; pocos en verdad se han realizado.

Sin embargo, una discusión de las preguntas “¿Por qué?” y “¿Por qué no?” que la bioquímica terráquea se ha planteado puede empezar con una trialectica de tres tipos de explicaciones.⁴ El primer tipo es funcional y plantea la hipótesis de que, si en la vida existe una estructura química, es porque constituye la mejor solución a un problema biológico en particular. En el paradigma darwiniano, “mejor” significa “confiere la mejor adecuación”, o, por lo menos, una mayor adecuación que las opciones no utilizadas. Esta explicación implica que el sistema viviente tuvo acceso a otras soluciones, que los individuos eligieron una de las opciones, y que los que eligieron la mala solución no lograron sobrevivir.

El segundo tipo de explicación es histórico. Resulta enorme el universo de las posibilidades químicas. Por ejemplo, el número de diferentes proteínas con una

² S. M. Hetch *et al.*, “Chemical Aminoacylation of Transfer-RNAs”, *Journal of Biological Chemistry*, 253: 4517-4520, 1978; J. W. Chin *et al.*, “An Expanded Eukaryotic Genetic Code”, *Science*, 301: 964-967, 2003; C. J. Noren *et al.*, “A General Method for Site-Specific Incorporation of Unnatural Amino Acids into Proteins”, *Science*, 244: 182-188, 1989; G., Baldini *et al.*, “Mischarging *Escherichia coli* tRNA^{Phe} with L-4'-[3-(Trifluoromethyl)-3H-Diazirin-3-yl]phenylalanine, a Photoactivatable Analog of Phenylalanine”, *Biochemistry*, 27: 7951-7959, 1988; J. D. Bain *et al.*, “Biosynthetic Site-Specific Incorporation of a Non-Natural Amino Acid into a Polypeptide”, *Journal of American Chemical Society*, 111: 8013-8014, 1989; T. Hohsaka y S. M. Masahiko, “Incorporation of Non-Natural Amino Acids into Proteins”, *Current Opinion in Chemical Biology*, 6: 809-815, 2002.

³ K. C. Schneider y S. A. Benner, “Oligonucleotides Containig Flexible Nucleoside Analogs”, *Journal of the American Chemical Society*, 112: 453-455, 1990; K. Augustyns, A. Vanaerschot y P. Herdewijn, “Synthesis of 1-(2,4-Dideoxy-Beta-D-Eiythro-Hexopyranosyl)thymine and its Incorporation into Oligonucleotides”, *Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters*, 2: 945-948, 1992; A. Eschenmoser, “Chemical Etiology of Nucleic Acid Structure”, *Science*, 284: 2118-2124, 1999.

⁴ S. A. Benner y D. A. Ellington, “Interpreting the Behavior of Enzymes: Purpose or Pedigree?”, *CRC Critical Reviews in Bioengineering*, 23: 369-426, 1998.

longitud de 100 aminoácidos, partiendo de las combinaciones de los 20 aminoácidos naturales, es mayor que el número de átomos en el cosmos. La vida en la Tierra ciertamente no tuvo tiempo para poner a prueba todas las posibles secuencias a fin de encontrar la mejor. Lo que existe en la vida terráquea moderna, por lo tanto, debe reflejar algunas contingencias, ciertos sucesos aleatorios en la historia que motivaron una opción en vez de otra, fuera o no esta opción la óptima.

Es difícil evaluar las explicaciones de este tipo porque poco sabemos sobre la hipersuperficie que relaciona la secuencia de una proteína con su habilidad para conferir adecuación.⁵ Si esta superficie fuera relativamente lisa, entonces las soluciones óptimas podrían alcanzarse mediante los procesos de búsqueda darwinianos, sin que importara dónde las contingencias dieran inicio a la búsqueda. Pero si la superficie fuera áspera, entonces muchas estructuras de la vida terráquea serían localmente óptimas, así como subóptimas en relación con el universo de las posibilidades. Los mecanismos darwinianos no son capaces de encontrar fácilmente una solución globalmente óptima en una hipersuperficie áspera.

El tercer tipo se apoya en el concepto de la vestigialidad. Aquí se observa que algunos de los aspectos de la bioquímica contemporánea terráquea pudieron haber emergido por causa de presiones selectivas que ya no existen. Por lo tanto, un aspecto contemporáneo acaso no represente la optimización en el mundo moderno, sino que más bien sea un vestigio de la optimización en un mundo primitivo. Tales modelos explican, por ejemplo, el apéndice humano, así como muchos de los detalles químicos de la vida moderna (tales como un componente de ARN con muchos cofactores).

Se pueden ilustrar estos tres tipos de explicaciones con las posibles respuestas a una pregunta que se han hecho muchos estudiantes de bioquímica: ¿por qué usa el ADN la adenina, que sólo forma dos enlaces de hidrógeno con la timina? La aminoadenina produce un acoplamiento más fuerte⁶ (figura XII.1). Una explicación funcional podría argumentar que los genomas son óptimos cuando tienen tanto un par débil (A*T) como un par fuerte (G*C). Una explicación histórica propone que la adenina se eligió arbitrariamente en vez de otras sustancias existentes por causa de una contingencia, y se conservó porque resultaba muy difícil posteriormente remplazarla sin perder adecuación. Una explicación basada en el concepto de la vestigialidad alega que la adenina, y no la aminoadenina, se hizo

⁵ *Idem.*

⁶ C. R. Geyer, T. R. Battersby y S. A. Benner, "Nucleobase Pairing in Expanded Watson-Crick-like Genetic Information Systems: The Nucleobases", *Structure*, 11: 1145-1498, 2003.

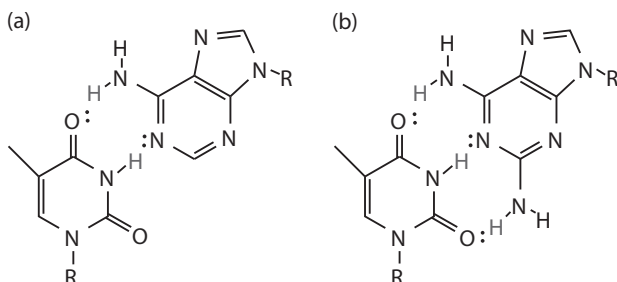


FIGURA XII.1. Dos puentes de hidrógeno unen el par de bases de timina-adenina (T-A). ¿Por qué no se utiliza la aminoadenina (b) en vez de la adenina a fin de producir un par de bases más fuerte unido por tres puentes de hidrógeno? © Current Opinion in Chemical Biology.

prebióticamente a partir del cianuro de amonio.⁷ Aquí la disponibilidad prebiótica de la adenina hizo que fuera mejor para originar la vida, aun cuando la amino-adenina acaso sería preferible hoy.

Es útil construir con estas explicaciones hipótesis alternativas, aun cuando actualmente ningún experimento pueda ponerlas a prueba. La construcción de la dialéctica les permite a los científicos apreciar cuán accesibles son las explicaciones alternativas. Esto a su vez le proporciona un cierto nivel disciplinario a una discusión en que la respuesta de “No sabemos” probablemente sería la más apropiada. Este artículo examina algunas de las restricciones químicas para la vida, y algunas de las posibles estructuras químicas de las formas de vida diferentes.

¿QUÉ ES LA VIDA?

Para establecer si hay un plan químico común para la vida, tenemos que establecer lo que la vida es.⁸ Un panel de científicos reunidos por la NASA en 1994 ha sido uno de los muchos grupos que han reflexionado sobre esta cuestión. El panel definió la vida como un “sistema químico capaz de experimentar la evolución

⁷ J. Oró, “Synthesis of Adenine from Ammonium Cyanide”, *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2: 407-412, 1960.

⁸ C. E. Cleland y C. F. Chyba, “Defining ‘Life’”, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 32: 387-393, 2002; K. Mirazo, J. Peretó y A. Moreno, “A Universal Definition of Life: Autonomy and Open-Ended Evolution”, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 34: 323-346, 2004.

darwiniana”.⁹ Aquí se utilizará esta definición, que se basa en una definición anteriormente propuesta por Sagan.¹⁰

Esta definición contrasta con muchas otras que se han propuesto, y elude muchas de sus fallas. Por ejemplo, algunas definiciones confunden la “vida” con el concepto de estar “vivo”. Así, preguntar si un ente puede moverse, comer, metabolizar o reproducirse sería preguntar si está vivo. Pero un solo conejo macho (por ejemplo) que está vivo no puede (por sí solo) experimentar la evolución darwiniana, y por lo tanto no representa la “vida”.¹¹

Por añadidura, muchos intentos de definir la “vida” tropiezan con el hecho de que no es posible definir filosóficamente de manera completa ningún término que no sea trivial.¹² La imposibilidad general de definir los términos, teóricamente o funcionalmente, ha sido uno de los descubrimientos de la filosofía del siglo xx, y no sólo en relación con la definición de la “vida”. Por ejemplo, es imposible definir completamente el “agua”. Podemos decir que el agua es “óxido de dihidrógeno”, ¿pero nos referimos a una molécula de agua, al agua como sustancia, o al agua funcionalmente? ¿Y qué es el “hidrógeno”? Todo intento de definir la vida en este nivel choca con preguntas análogas que pueden ser paralizantes.

La frase “evolución darwiniana” acarrea un bagaje de 150 años de discusiones y elaboraciones. Hace referencia específica a un proceso que involucra un sistema molecular (el ADN en la Tierra) que no se replica perfectamente y cuyas imperfecciones son ellas mismas hereditarias. Por lo tanto, la evolución darwiniana implica algo más que la reproducción, hecho que se destaca en muchas definiciones de la vida.

La definición de la NASA también evita la confusión respecto a muchos sistemas no vivientes que se reproducen. Por ejemplo, un cristal de clorato de sodio molido puede propiciar el desarrollo de otros cristales de la misma especie;¹³ por lo tanto, el cristal se reproduce de esta manera. Algunas características del cristal, como su quiralidad, pueden transmitirse a sus descendientes.¹⁴ La replicación es imperfecta; un cristal verdadero de clorato de sodio contiene defectos. La especificación de todos los defectos requeriría una cantidad enorme de información,

⁹ D. W. Deamer y G. R. Fleischaker (comps.), *Origins of Life: The Central Concepts*, Jones & Bartlett, Boston, 1994.

¹⁰ C. Sagan, s.v. “Life”, *The Encyclopædia Britannica*, William Benton, Londres, 1970.

¹¹ D. E. Koshland, “The Seven Pillars of Life”, *Science*, 295: 2215-2216, 2002.

¹² S. P. Schwartz, “Introduction”, en S. P. Schwartz (comp.), *Naming, Necessity, and Natural Kinds*, Cornell University Press, Nueva York, 1977.

¹³ D. K. Kondepudi, R. J. Kauffman y N. Singh, “Chiral Symmetry-Breaking in Sodium-Chlorate Crystallization”, *Science*, 250: 975-976, 1990.

¹⁴ *Idem*.

aproximadamente la misma cantidad de información que contiene el genoma humano. Pero la información de estos defectos no es ella misma hereditaria. Por lo tanto, el cristal de clorato de sodio no puede experimentar la evolución darwiniana. De ahí que un sistema de clorato de sodio no representa la vida.¹⁵

Es interesante por otras razones la definición de la vida propuesta por la NASA. Primero, proporciona información sobre las formas de vida que se creía que eran posibles, no sólo concebibles. Como saben los fanáticos de *Star Trek [Viaje a las estrellas]*, no es difícil concebir formas de vida que *no son* sistemas químicos capaces de experimentar la evolución darwiniana. Aparte de los alienígenas parecidos a actores de Hollywood con prótesis, la nave espacial *Enterprise* se ha encontrado con alienígenas conceptuales que no se ajustan a la definición del panel. Los nanites que infectaron la computadora del *Enterprise* en el episodio 49 de *Star Trek: la nueva generación* (“Evolución”), son esencialmente informativos; su evolución darwiniana no se vincula con una molécula informativa, como el ADN (aunque sí requieren una matriz química para sobrevivir). El ente cristalino del episodio 18 (“Suelo habitado”) y del episodio 104 (“Entidad de silicio”) parece ser de naturaleza química, pero no patentemente darwiniana. Los calamarios (episodio 51: “Q”) son una forma de vida conceptual que consiste en energía pura, la cual evidentemente no requiere materia. Y Q (episodio 1: “Encuentro en Farpoint”) no parece ser materia ni energía, yendo y viniendo del continuum sin una necesidad aparente de cualquiera de las dos.

Si nos hubiésemos de encontrar con cualquiera de estos entes conjeturales durante un viaje real, no conceptual, a través de las estrellas, estaríamos obligados a aceptar que representan sistemas vivientes. Tendríamos que cambiar nuestra definición de la vida. Ahora no tenemos que hacerlo, simplemente porque no creemos en la existencia de los extraños seres creados por los guionistas de *Star Trek*.

Los nanites y el androide ficticio Data son ejemplos de la vida artificial. No dudamos que sea posible crear androides, incluso aquellos (advuértase el pronombre) androides que desearan ser humanos. Pero no creemos que Data haya podido surgir espontáneamente, sin que alguien lo creara, un creador que ya hubiera emergido de un proceso darwiniano (como efectivamente sucedió en el caso de Data). Por lo tanto, podríamos ver a Data como una biofirma o incluso pensar que está vivo, aunque no lo viéramos como una forma de vida. Por la misma razón, una computadora que alojara nanites sería la evidencia de que una

¹⁵ G. Arrhenius, “Crystals and Life”, *Helvetica Chimica Acta*, 86: 1569-1586, 2003.

forma de vida la creó a ella; la computadora sería una biofirma y los nanites una forma de vida artificial, un ente que para emerger necesita el sustento de la vida natural.

LOS REQUISITOS BÁSICOS DE LA VIDA

La definición del panel de la NASA también es útil porque se refiere directamente a los principios químicos que la ciencia terráquea conoce bien. Los principios químicos generan una jerarquía de los requisitos de la vida. Estos requisitos probablemente son comunes en toda la vida en el cosmos, por lo menos la vida tal como la define el panel. Aquí los enumeramos, comenzando con los más necesarios (y con más probabilidad de ser universales) y terminando con los menos necesarios.

EL DESEQUILIBRIO TERMODINÁMICO

En la medida que la evolución darwiniana es un proceso progresivo, y en la medida en que la vida efectivamente realiza algo, la vida necesita un medio ambiente que no se encuentre en equilibrio termodinámico. Esta afirmación es ciertamente verdadera, o casi, en relación con toda la vida, inclusive la artificial.

La afirmación no implica un metabolismo químico universal, incluso en la Tierra. En todos los lugares de la Tierra donde existe un desequilibrio termodinámico, los organismos al parecer han generado un metabolismo distinto para explotarlo. Todos estos organismos tienen la necesidad del desequilibrio.

El requisito de un medio ambiente desequilibrado a veces se describe como la necesidad de una “fuente de energía” o de “compuestos de gran energía”. Aunque sea técnicamente cierta, esta locución puede ser problemática. Por ejemplo, De Duve dice que la vida emerge en medios ácidos a temperaturas altas porque en esos lugares se forman espontáneamente tioésteres “ricos en energía”.¹⁶ Efectivamente. Pero en ese medio ambiente los tioésteres no representan una “gran energía” (ellos se forman espontáneamente). De manera similar, en un medio ambiente con poca agua, pero rico en ADP y fosfato inorgánico, la formación del ATP es espontánea, y el ATP posee menos “energía” que el ADP y el fosfato inorgánico.

Es fácil encontrar el desequilibrio termodinámico en el cosmos. No pueden

¹⁶ C. de Duve, *Blueprint for a Cell: The Nature and Origin of Life*, Neil Patterson, Burlington, 1991.

estar en equilibrio termodinámico la mayoría de los ambientes que se encuentran en la vecindad de una reacción de fusión nuclear, tal como la de nuestro Sol. De hecho, exponerse sin protección a los efectos del flujo de la energía del Sol es arriesgarse a recibir demasiada energía, como lo saben aquellos que han sufrido quemaduras de sol.

Durante la mayor parte de la historia humana, se consideró que una estrella era la *única* manera de obtener el desequilibrio termodinámico (por ejemplo, Génesis, 1.3, y el *Popol Vuh*). Robert Heinlein ha sugerido que el castigo mayor que una corte intergaláctica le podía imponer a un planeta infractor era quitarle su sol.¹⁷ De acuerdo con esta idea, una característica universal de la vida sería una cadena alimenticia que empezara con un organismo autótrofo que convirtiera los fotones de una estrella en desequilibrio químico.

Pero existen otros desequilibrios en los planetas. Por ejemplo, los núcleos atómicos más pesados, residuos de una supernova, no se encuentran en equilibrio termodinámico. La descomposición de estos núcleos es una poderosa fuente de ambientes planetarios desequilibrados. La descomposición radiactiva propulsa los procesos tectónicos y volcánicos. Éstos crean medios no equilibrados en muchas áreas,¹⁸ tales como las chimeneas negras en el suelo de los océanos.¹⁹ El consecuente desequilibrio energético sustenta la vida a pesar de la ausencia de la energía solar directa.

Stevenson advirtió que la energía geotermal se ubica en la parte más baja de la cadena alimenticia, y que por lo tanto los planetas pequeños similares a la Tierra que sustentaban la vida con energía geotermal acaso fueron expulsados de los sistemas solares en formación.²⁰ Luego pudieron viajar a través de la galaxia portando la vida, una vida totalmente independiente de la influencia de una estrella. Dependiendo de la frecuencia de tales expulsiones, los planetas de este tipo pudieron albergar la gran mayoría de las formas de vida en nuestra galaxia, todas las cuales vivían sin un sol, sustentándose gracias a la descomposición de los núcleos radiactivos arrojados por las antiguas explosiones de las supernovas.

¹⁷ R. Heinlein, *Have Space Suit, Will Travel*, Del Ray Books, Del Ray, 1983.

¹⁸ D. S. Kelley *et al.*, "AT3-60 Shipboard Party: An Off-Axis Hydrothermal Vent Field Near the Mid-Atlantic Ridge at 30° N", *Nature*, 412: 145-149, 2001.

¹⁹ J. B. Corliss *et al.*, "Submarine Thermal Springs on the Galapagos Rift", *Science*, 203 (4385): 1073-1083, 1979.

²⁰ D. Stevenson, "Life-Sustaining Planets in Interstellar Space?", *Nature*, 400: 32, 1999.

LOS ENLACES

Un requisito menos importante para la vida es que ésta se tenga que basar necesariamente en los enlaces covalentes. El concepto es imperfecto; la distinción misma entre los enlaces covalentes y los no covalentes refleja el lenguaje de los organismos que viven a una temperatura de 310K. De hecho, hay una gama de enlaces químicos, desde los más fuertes, que sobreviven durante un periodo considerable incluso a temperaturas tan altas como 1000K, hasta los más débiles, que sólo existen cerca del cero absoluto.

La vida terráquea utiliza varios tipos de enlaces. El enlace covalente carbono-carbono, típicamente 400kJ/mol en relación con la fragmentación homolítica, es el más fuerte de todos. Un enlace de hidrógeno sólo alcanza 20kJ/mol. Sin embargo, es lo suficientemente fuerte como para ser importante en la vida terráquea a una temperatura de 273K-373K. El enlace de hidrógeno le confiere al agua sus más distintivas propiedades físicas, incluidos su alto punto de ebullición, la amplia gama de temperaturas dentro de la cual es líquida y el aumento de su volumen al congelarse. Además, el enlace de hidrógeno es el causante principal del efecto hidrofóbico, y del hecho de que el agua y el aceite formen fases separadas a 310K.

Sin embargo, la mayor parte del universo no se sitúa entre 273K y 373K, ámbito donde los enlaces covalentes son necesarios y los enlaces de hidrógeno son útiles. A temperaturas más bajas es posible que los enlaces no covalentes se impongan en la bioquímica. El tipo de enlace que sustenta la transferencia de información necesaria en la evolución darwiniana podría requerir universalmente enlaces lo suficientemente fuertes a temperaturas ambientales como para ser estables por un tiempo apropiado. En el agua a 273K-373K, una combinación de enlaces covalentes, de enlaces de hidrógeno, y del efecto hidrofóbico cumple con este requisito. En otros solventes y a otras temperaturas pueden ser más adecuados los enlaces de tipo diferente.

EL AISLAMIENTO DENTRO DEL MEDIO AMBIENTE

El egoísmo es esencial en la evolución darwiniana. Un ciclo darwiniano sólo puede ocurrir si se replica a sí mismo más que lo que se replican los otros. Una gran cantidad de la literatura del ramo discute el aislamiento en el contexto del parasi-

tismo y el altruismo.²¹ Gran parte de la reciente literatura sobre los sistemas moleculares que logran el aislamiento enfocan los liposomas y otras estructuras membranosas que son semejantes a las bicapas lípidas que se hallan a lo largo de la vida terráquea.²² Un experimento interesante del laboratorio de Szostak vincula la mineralogía con la formación de los liposomas.²³ Este tipo de compartimentación se basa en la inmiscibilidad de líquido/líquido y en el efecto hidrofóbico. No es preciso que ésta sea la única manera de lograr el aislamiento, evidentemente. El aislamiento puede lograrse en una superficie de dos dimensiones, donde un sistema viviente tenga una dimensión de fractal 2+.²⁴

EL ENSAMBLAJE DE CARBONO

La estabilidad del enlace carbono-carbono a 273K-373K lo ha convertido en el elemento preferido para el andamiaje de las biomoléculas. Pero son necesarios otros elementos, incluso en la bioquímica terráquea. El hidrógeno es necesario por muchos motivos; el menor de ellos es que completa las cadenas de C-C. Los heteroátomos (átomos que no son ni de carbono ni de hidrógeno) determinan la reactividad de las biomoléculas del andamiaje de carbono. En la vida terráquea, estas moléculas son de oxígeno, nitrógeno, y, en menor medida, de azufre, fósforo, selenio y, ocasionalmente, de halógeno.

Aunque generalmente se considere que el carbono es el único elemento posible en los andamiajes,²⁵ el silicio es una segunda opción que con frecuencia se menciona (véase el episodio 26 del *Star Trek* original, “El diablo en la oscuridad”). Al igual que el carbono, el silicio puede formar cuatro enlaces. El enlace silicio-silicio es más débil que el enlace carbono-carbono,²⁶ pero no excesivamente

²¹ R. Dawkins, *The Selfish Gene*, Oxford University Press, Oxford, 1989.

²² I. A. Chen y J. W. Szostak, “Membrane Growth Can Generate a Transmembrane pH Gradient in Fatty Acid Vesicles”, *Proceedings of National Academy of Sciences*, 101: 7965-7970, 2003; P. L. Luisi, P. Walde y T. Oberholzer, “Lipid Vesicles as Possible Intermediates in the Origin of Life”, *Current Opinion on Colloid and Interface Science*, 4: 33-39, 1999; J. W. Szostak, D. P. Bartel y P. L. Luisi, “Synthesizing Life”, *Nature*, 409: 387-390, 2001; D. Deamer *et al.*, “The First Cell Membranes”, *Astrobiology*, 2: 371-381, 2002.

²³ M. M. Hanczyc, S. M. Fujikawa y J. W. Szostak, “Experimental Models of Primitive Cellular Compartments: Encapsulation, Growth, Division”, *Science*, 302: 618-622, 2003.

²⁴ G. Wächtershäuser, “Evolution of the First Metabolic Cycles”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87: 200-204, 2003.

²⁵ N. Pace, “The Universal Nature of Biochemistry”, *Proceedings of National Academy of Sciences*, 98: 805-808, 2001; S. L. Miller y L. E. Orgel, *The Origins of Life on the Earth*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1974.

²⁶ R. Walsh, “Bond Dissociation Energy Values in Silico-Containing Compounds and Some of their Implications”, *Accounts of Chemical Research*, 14: 246-252, 1981.

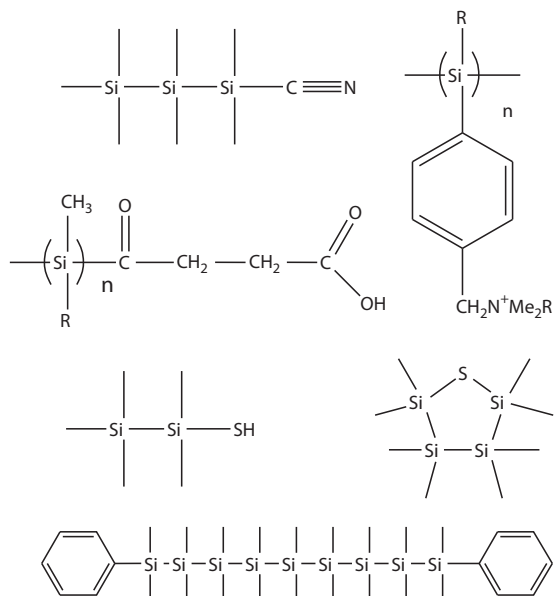


FIGURA XII.2. Estructuras de algunos polisilanos sintéticos que se han descrito en la bibliografía. Es indudable que la diversidad polimérica es posible utilizando el silicio como andamiaje en vez del carbono. © Current Opinion in Chemical Biology.

(típicamente, alrededor 300kJ/mol, comparado con 400kJ/mol en un típico enlace carbono-carbono).

De hecho, se han construido muchos compuestos a partir de un andamiaje de silicio-silicio. Se conocen los oligosilanos con 26 enlaces consecutivos Si-Si; éstos soportan diversas cadenas laterales funcionales y no funcionales (figura XII.2). Estas estructuras son semejantes a las de las membranas terráqueas. A los químicos les interesan porque pueden formar polisilanos sigma-conjugados.²⁷ Las propiedades electrónicas de estos compuestos son similares a las del sistema pi-conjugado que contiene carbono.

Los oligosilanos por lo general tienen cadenas laterales de alquilo. Éstas por lo general son solubles en disolventes no polares. Se conocen polisilanos más cortos que contienen extremos reactivos (cianuro, hidroxilo, fenol) que permiten todavía más modificaciones y solubilidad en disolventes polares. Por ejemplo, los oligosilanos fenólicos se disuelven en alcohol, éter acetona y agua ligeramente al-

²⁷ J. Maxka, L. M. Huang y R. West, "Synthesis and NMR Spectroscopy of Permethylpolysilane Oligomers $\text{Me}(\text{SiMe}_2)_{10}\text{Me}$, $\text{Me}(\text{SiMe}_2)_{16}\text{Me}$, and $\text{Me}(\text{SiMe}_2)_{22}\text{Me}$ ", *Organometallics*, 10: 656-659, 1991.

calina. Los oligosilanos que portan grupos de ácido carboxílico son solubles en agua.²⁸ Los oligosilanos amfifílicos se autoagregan en el agua, creando vesículas y micelas.²⁹ Los oligosilanos también pueden ser quirales (a pesar de lo que se dice al respecto en el sitio web de astrobiología de la NASA, <http://nai.arc.nasa.gov/astrobio/feat_questions/silicon_life.cfm>).

La unidad silicio-oxígeno-silicio (silicón) también puede hacer andamiajes, los cuales hoy se utilizan en las pelotas y los implantes de senos. El silicio y el oxígeno por sí solos no pueden generar una química particularmente interesante. Para lograrlo, las unidades de Si-O- deben tener cadenas laterales que incluyan el carbono, el hidrógeno, el nitrógeno, el oxígeno y otros heteroátomos. Sin embargo, un tipo de vida construida de esta manera se describiría como una forma de vida basada en el silicio, así como decimos que la vida terráquea se basa en el carbono aunque dependa de otros átomos tanto como del carbono.

La reactividad del silicio y la del carbono son diferentes en algunos aspectos notables. Primero, su posición en la tercera fila de la tabla periódica significa que el silicio contiene orbitales *d* de baja energía. Por lo tanto, el mecanismo asociado para la reacción con el silicio, cuando un nucleófilo entrante forma un enlace antes de que salga un grupo saliente, es accesible al silicio pero no al carbono. Por esta razón muchos compuestos que contienen silicio son más reactivos que los análogos de carbono. El hecho de que esta diferencia en la reactividad sea o no ventajosa depende del punto de vista. La mayor reactividad del silicio, comparada con la del carbono, podría ser una ventaja en ambientes fríos.³⁰

Un criterio más débil es que la vida necesita un andamiaje basado en el carbono o el silicio. No hay una tercera opción si se considera que el andamiaje covalente es un requisito imprescindible. Las formas de vida extrañas basadas en el enlazamiento iónico, o el metálico, son en principio concebibles, pero sólo en principio actualmente. Sin embargo, es interesante consultar los escritos de Cairns-Smith y Hartman,³¹ que han reflexionado sobre las cuestiones relacionadas con la transferencia de información en sistemas que ni se basan en el carbón ni dependen de los enlaces covalentes.

²⁸ S. Hayase *et al.*, "Syntheses of Polysilanes with Functional Groups 2: Polysilanes with Carboxylic Acids", *Macromolecules*, 22: 2933-2938, 1989; S. Hayase, "Polysilanes with Functional Groups", *Endeavor*, 19: 125-131, 1995.

²⁹ T. Sanji, F. Kitayama y H. Sakurai, "Self-Assembled Micelles of Amphiphilic Polysilane Block Copolymers", *Macromolecules*, 32: 5718-5720, 1999.

³⁰ W. Bains, 2004, *op. cit.*

³¹ A. G. Cairns-Smith, "The Origin of Life and the Nature of the Primitive Gene", *Journal of Theoretical Biology*, 10: 53-88, 1996; A. G. Cairns-Smith y H. Hartman, *Clay Minerals and the Origin of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986.

PATRONES ENERGÉTICOS EN EL METABOLISMO

Para que una secuencia metabólica pueda convertir los sustratos en productos, tanto la secuencia como los sustratos tienen que estar en desequilibrio. Cuando no lo están, la reacción general debe acoplarse con otra reacción en que los sustratos y los productos estén en desequilibrio. Los libros de texto explican esto diciendo que es necesario que una vía metabólica proceda energéticamente hacia abajo, o que se acople con una fuente de energía.

Los pasos internos de muchas vías metabólicas terráneas de múltiples pasos se dan cerca del equilibrio (figura XII.3), siendo el primer paso un sitio de regulación que procede energéticamente hacia abajo. Es necesario, sin embargo, que también el último paso proceda energéticamente hacia abajo, llevando de esta manera la reacción hasta su conclusión.³² Es posible que este aspecto sea universal en las vías metabólicas, simplemente porque explota de la manera más económica el desequilibrio químico del entorno. Resultaría poco económico que la energía libre decayera en cada uno de los pasos de una vía metabólica.

Esta característica relación energética entre una serie de compuestos que son intermedios en un metabolismo evolucionado podría ser una biofirma universal. Si el inventario de las moléculas pequeñas en un supuesto sistema viviente (por ejemplo, en Titán, la luna más grande de Saturno) mostrara esta relación energética característica, esto podría ser una evidencia de que la evolución darwiniana está creando un metabolismo óptimo.

EL DISOLVENTE

Que la fase líquida propicia las reacciones químicas es algo que se sabe empíricamente desde hace siglos. En cuanto disolvente, un líquido permite que los reactivos disueltos se encuentren entre sí con más frecuencia que los elementos en un sólido. Claro es que las reacciones químicas pueden tener lugar en las fases gaseosas y sólidas. Pero éstas están en desventaja respecto a la fase líquida.

En la fase gaseosa, los procesos químicos se limitan a las moléculas que son lo suficientemente volátiles como para entregar cantidades adecuadas de sustancias a la fase gaseosa y/o a las moléculas lo suficientemente estables como para

³² D. Voet y J. Voet, "Biochemistry", J. Wiley & Sons, Hoboken, 2004.

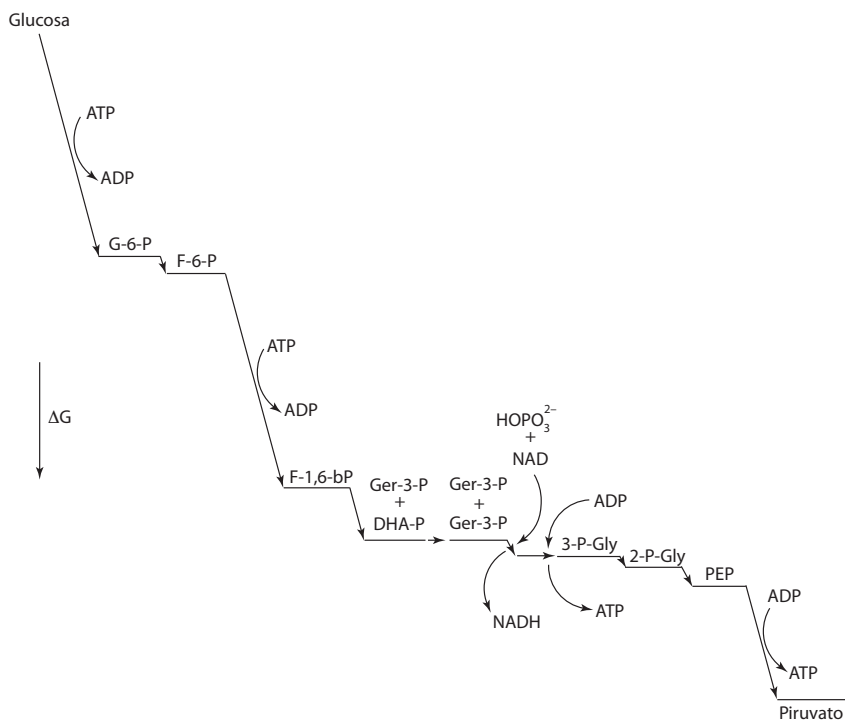


FIGURA XII.3. Diagrama de la energía fisiológica libre en la reacción de la glicólisis de uno de los dos Ger-3-P generados. G, glucosa; G-6-P, glucosa-6-fosfato; F-6-P, fructuosa-6-fosfato; F-1,6-bP, fructuosa-1,6-bisfosfato; Ger-3-P, gliceraldehído-3-fosfato; DHA-P, dihidroxiacetona-P; 3-P-Gly, 3-fosfoglicerato; 2-P-Gly, 2-fosfoglicerato; PEP, fosfoenolpiruvato. La altura vertical es proporcional al cambio en la energía libre (ΔG). © Current Opinion in Chemical Biology.

sobrevivir en las temperaturas más altas donde la presión del vapor es mayor. Obviamente, si el volumen es abundante, las presiones son bajas, y los periodos de tiempo largos, incluso bajas concentraciones de biomoléculas podrían sustentar un biosistema en la fase gaseosa. Es incluso concebible que en el vacío del espacio interestelar la vida exista mediante moléculas en alta dilución que reaccionan en la fase gaseosa. Claro es que las desventajas de esta posibilidad consistirían en las dificultades de mantener juntos a los componentes de la forma de vida interestelar. Pero sería una ventaja que no tuviera que limitarse al tiempo de vida de un sistema planetario. De hecho, uno se puede imaginar vida en la fase gaseosa, asociada con una galaxia y su flujo de energía, habiendo existido desde casi el inicio del universo.

Asimismo, las sustancias pueden difundirse a través de los sólidos para pro-

ducir reacciones químicas.³³ Sin embargo, es lenta la difusión en la fase sólida. Aun así, se puede concebir una bioquímica de este tipo capaz de sustentar una evolución darwiniana, dados los necesarios periodos de tiempo cósmicos y el suministro de energía mediante partículas de alta energía.³⁴ Una forma de vida extraña podría residir en los sólidos de la nube de Oort (una gran esfera de desechos cósmicos que rodea el Sistema Solar y es el origen de los cometas), viviendo en aguas congeladas profundas, obteniendo energía ocasionalmente de los radicales libres dejados por la radiación ionizante, y realizando sólo unas cuantas transformaciones metabólicas cada milenio.

Disolventes como el agua, pero no el agua

El amoníaco líquido es un posible disolvente para la vida, y una alternativa del agua. En efecto, el agua y el amoníaco son análogos. El amoníaco, como el agua, disuelve muchos compuestos orgánicos. El amoníaco, como el agua, se mantiene en estado líquido a través de una amplia gama de temperaturas (195 K-240 K a 1 atm). La gama líquida es todavía más amplia a mayor presión. Por ejemplo, a 60 atm el amoníaco es líquido a 196 K-371 K. Además, el amoníaco líquido posiblemente abunda en el Sistema Solar. Existe, por ejemplo, en las nubes de Júpiter.

El menor potencial del amoníaco para los enlaces de hidrógeno se considera como un defecto en algunas discusiones sobre la capacidad del amoníaco como disolvente biológico. El amoníaco tiene tres donantes de enlaces de hidrógeno y sólo un aceptor de enlace de hidrógeno, mientras que el agua tiene dos de cada uno. Este desequilibrio explica el hecho de que sea menor el punto de ebullición del amoníaco, comparado con el del agua.

La mayor capacidad del amoníaco para disolver moléculas orgánicas hidrofóbicas (en comparación con el agua, nuevamente) implica una mayor dificultad para utilizar el efecto hidrofóbico a fin de generar la compartimentación. Esto a su vez implica que los liposomas, compartimientos que funcionan en el agua, generalmente no funcionan en el amoníaco líquido.

Sin embargo, la separación de la fase hidrofóbica es posible en el amoníaco, aunque sólo a temperaturas bajas. Por ejemplo, Brunner ha reportado que el amo-

³³ B. Huang y J. J. Walsh, "Solid-Phase Polymerization Mechanism of Poly(ethyleneterephthalate) Affected by Gas Flow Velocity and Particle Size, *Polymer*, 39: 6991-6999, 1998.

³⁴ V. I. Goldanskii, "Nontraditional Mechanisms of Solid-Phase Astrochemical Reactions", *Kinetics and Catalysis*, 37: 608-614, 1996.

niaco líquido y los hidrocarburos forman dos fases, donde la cadena del hidrocarburo contiene unidades de $1-36 \text{ CH}_2$.³⁵ A diferentes temperaturas y presiones, diferentes tipos de hidrocarburos pueden ser miscibles con el amoniaco. Así, la separación de fase que es útil para el aislamiento sería concebible en el amoniaco líquido a temperaturas muy por debajo de su punto de ebullición a presiones estándar.

También hay que considerar la mayor basicidad del amoniaco líquido. El ácido y la base en el agua son H_3O^+ y HO^- . En el amoniaco, NH_4^+ y NH_2^- son el ácido y la base, respectivamente. H_3O^+ , con un pK_a de -1.7 , es aproximadamente 11 órdenes de magnitud más fuerte como ácido que el NH_4^+ , con un pK_a de 9.2 (en el agua). Similarmente, el NH_2^- es cerca de 15 órdenes de magnitud más fuerte como base que el HO^- .

El amoniaco no podría sustentar la química de la vida terráquea, desde luego. La vida terráquea explota los compuestos que contienen la unidad carbonilo $\text{C}=\text{O}$. En el amoniaco, los compuestos carbonilo se convierten en compuestos que contienen la correspondiente unidad $\text{C}=\text{N}$. Sin embargo, hipotéticamente, es posible proponer las reacciones que explotan una unidad $\text{C}=\text{N}$ en el amoniaco como análogas a las reacciones bioquímicas metabólicas que explotan la unidad $\text{C}=\text{O}$ en el agua en el metabolismo terráqueo (figura XII.4).³⁶ Dada esta correspondencia, es fácilmente concebible el metabolismo en el amoniaco líquido.

El amoniaco no es el único disolvente polar que podría servir como una alternativa del agua. Por ejemplo, el ácido sulfúrico es un disolvente razonablemente bueno que sustenta la reactividad química.³⁷ Además, se sabe que hay ácido sulfúrico sobre Venus.³⁸ Allí, la mayor parte de las tres capas de nubes que se encuentran a una distancia de entre 40 y 70 kilómetros, se compone de aerosoles de ácido sulfúrico; aproximadamente 80% en la capa superior y 98% en la capa inferior.³⁹ La temperatura (cerca de 310 K, a cerca de 50 km de altitud, a cerca de 1.5 atm) es la conveniente para los enlaces covalentes estables de carbono-carbono.

³⁵ E. Brunner, "Fluid Mixtures at High Pressures VI: Phase Separation and Critical Phenomena in 18 (n-Alkyl + Ammonia) and 4 (n-Alkane + Methanol) Mixtures", *Journal of Chemical Thermodynamics*, 20: 1397-1409, 1988.

³⁶ J. B. S. Haldane, "The Origins of Life", *New Biology*, 16: 173-175, 1954.

³⁷ G. A. Olah *et al.*, "Preparative Carbocation Chemistry 13: Preparation of Carbocations from Hydrocarbons via Hydrogen Abstraction with Nitrosonium Hexafluorophosphate and Sodium Nitrite Trifluoromethanesulfonic Acid", *Journal of Organic Chemistry*, 43: 173-175, 1978.

³⁸ M. A. Kolodner y P. G. Steffes, "The Microwave Absorption and Abundance of Sulfuric Acid Vapor in the Venus Atmosphere Based on New Laboratory Measurements", *Icarus*, 132: 151-169, 1998.

³⁹ D. Schuze-Makuch *et al.*, "A Sulfur-Based Survival Strategy for Putative Phototropic Life in the Venusian Atmosphere", *Astrobiology*, 4: 11-18, 2004.

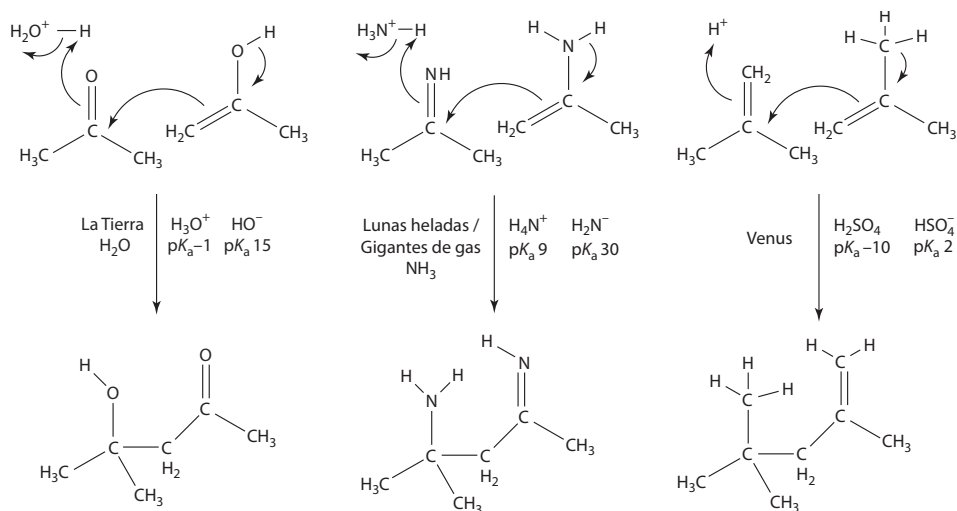


FIGURA XII.4. Grupos funcionales diferentes, pero mecanismos análogos, podrían utilizarse para formar nuevos enlaces carbono-carbono en diferentes disolventes. En el agua, la unidad $\text{C}=\text{O}$ podría proporcionar la reactividad necesaria. En el amoníaco, la unidad $\text{C}=\text{N}$ podría proporcionar la reactividad necesaria. En el ácido sulfúrico, la unidad $\text{C}=\text{O}$ es suficiente para proporcionar la reactividad necesaria. © Current Opinion in Chemical Biology.

Muchos autores han planteado la posibilidad de la vida en el medio ambiente ácido de Venus,⁴⁰ contradiciendo las anteriores ideas de que Venus podría estar cubierto por pantanos,⁴¹ o por mares calientes en los polos.⁴² La temperatura en la superficie de Venus es de aproximadamente 740 K. Sagan y Morowitz incluso han pensado en la posibilidad de organismos que flotan sobre la superficie caliente usando “vejigas de flotación” de hidrógeno,⁴³ similares a las de ciertos organismos acuáticos terráqueos.⁴⁴ Schulze-Makuch y sus colegas han considerado que

⁴⁰ C. S. Cockel, “Life on Venus”, *Planetary Space Science*, 47: 1487-1501, 1999; J. Colin *et al.*, “Venus: A Search for Clues to Early Biological Possibilities”, en G. Carle, D. Schwartz y J. Huntington (comps.), *Exobiology in Solar System Exploration*, NASA, Ames Research Center, Moffet Field, California 1992, pp. 45-65 (NASA Special Publication, 512).

⁴¹ S. Arrhenius, *The Destinies of the Stars*, Putnam, Nueva York, 1918.

⁴² J. Seckbach y W. F. Libby, “Vegetative Life on Venus? Or Investigations with Alga which Grow under Pure CO_2 in Hot Acid Media at Elevated Pressures”, *Space Life Science*, 2: 121-143, 1970.

⁴³ C. Sagan y H. Morowitz, “Life in the Clouds of Venus”, *Nature*, 215: 1259-1260, 1967.

⁴⁴ W. S. Hoar y D. J. Randall, “Fish Physiology”, en J. E. Webb, J. A. Wallwork y J. H. Elgood (comps.), *Guide to Living Fishes*, 6 vols., Macmillan, Londres, 1969-1971.

es necesario obtener muestras de la atmósfera de Venus para investigar la posibilidad de que allí haya vida.⁴⁵

No son pocas las hipótesis metabólicas sobre la hipotética vida en los aerosoles ácidos. En un ácido fuerte, el enlace $C = O$ es reactivo como base, y puede sustentar un metabolismo, en cuanto análogo de la unidad $C = O$ (figura XII.4). Este tipo de reactividad química se ejemplifica en ciertos casos de la bioquímica terráquea. Por ejemplo, las reacciones basadas en ácidos de la unidad $C = O$ se utilizan por las plantas al sintetizar moléculas fragantes.⁴⁶ Y no son pocas las fuentes de energía en la atmósfera venusina. Por ejemplo, un metabolismo venusino podría explotar el flujo relativamente grande de radiación ultravioleta en las nubes venusinas.⁴⁷

La formamida es el tercer disolvente biológicamente interesante. La formamida, que se crea mediante la reacción del cianuro de hidrógeno con el agua, es polar como el agua. Sin embargo, en la formamida se sintetizan espontáneamente muchas sustancias que son termodinámicamente inestables en el agua en relación con la hidrólisis. Éstas incluyen el ATP (a partir del ADP y el fosfato inorgánico), nucleósidos (a partir de boratos de ribosa⁴⁸ y nucleobases), péptidos (a partir de aminoácidos), y hasta oligoribonucleótidos.⁴⁹ La formamida misma se hidroliza, lo cual significa que sólo perdura en un medio ambiente relativamente seco, tal como un desierto. Puesto que recientemente se ha propuesto que los medios desérticos son lugares potenciales para la síntesis prebiótica de la ribosa, lo mismo también puede ser cierto en el caso de la formamida.

⁴⁵ D. Schulze-Makuch, L. N. Irwin y T. Irwin, "Astrobiological Relevance and Feasibility of a Sample Collection to the Atmosphere of Venus", en H. Lacoste (comp.), *Proceedings of the First European Workshop on Exo-Astrobiology*, ESA Publication Division, Noordwijk, 2002, pp. 247-250.

⁴⁶ J. Kreuzweiser, J. P. Schnitzler y R. Steinbrecher, "Biosynthesis of Organic Compounds Emitted by Plants", *Plant Biology*, 1: 149-159, 1999; P. Weyerstah, "Synthesis of Compounds Isolated from Essential Oils", en V. Lanzotii y O. Taglialatela-Scafati (comps.), *Flavour and Fragrance Chemistry: Proceedings of the Phytochemical Society of Europe*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2000, pp. 57-66.

⁴⁷ D. Schulze-Makuch y L. N. Irwin, *Life in the Universe: Expectations and Constraints*, Springer, Berlín, 2004.

⁴⁸ A. Ricardo *et al.*, "Borate Minerals Stabilize Ribose", *Science*, 303 (5655): 196, 2004.

⁴⁹ A. M. Schoffstall, "Prebiotic Phosphorylation of Nucleosides in Formamide", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 7: 399-412, 1976; A. M. Schoffstall, R. J. Barto y D. L. Ramos, "Nucleoside and Deoxynucleoside Phosphorylation in Formamide Solutions", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 12 (2): 143-151, 1982; A. M. Schoffstall y E. M. Liang, "Phosphorylation Mechanisms in Chemical Evolution", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 15 (2): 141-150, 1985.

Los hidrocarburos: ¿disolventes biológicos no polares?

No es necesario enfocar únicamente los disolventes polares, como el agua, al considerar los posibles hábitats de la vida. Los hidrocarburos, desde el más pequeño (el metano) hasta los homólogos superiores (etano, propano, butano, etc.) abundan en el Sistema Solar.

El punto de ebullición del metano, etano, propano, butano, pentano y hexano es, respectivamente, de 109 K, 184 K, 231 K, 273 K, 309 K y 349 K a presión estándar. Por lo tanto, es posible que existan océanos de etano en Titán. A una temperatura promedio que se calcula en 95 K, el metano (que se congela a 90 K) sería líquido, lo cual sugiere que la superficie de Titán podría estar cubierta de océanos de metano.

Muchas discusiones sobre la vida en Titán han considerado la posibilidad de que el agua, usualmente congelada a la temperatura ambiental, podría permanecer líquida tras el calentamiento causado por impactos de meteoritos.⁵⁰ La vida en este medio ambiente acuoso estaría sujeta a las mismas constricciones y oportunidades que las que tiene la vida en el agua. Las pequeñas gotas de agua en los disolventes de hidrocarburo son, además, convenientes compartimientos celulares para la evolución, como lo han demostrado Tawfik y Griffiths en el laboratorio.⁵¹ Es posible obtener una emulsión de gotitas de agua en aceite mediante la simple agitación. Éste bien podría ser un modelo de cómo la vida en Titán ha logrado el aislamiento darwiniano.

¿Pero por qué no se podría utilizar de manera directa los hidrocarburos que se encuentran de manera natural en estado líquido en Titán como un disolvente para la vida? Una amplia experiencia empírica muestra que la reactividad orgánica en los disolventes de hidrocarburo no es menos versátil que en el agua. De hecho, se cree que muchas enzimas terráneas catalizan reacciones mediante un sitio activo que no es semejante al que emplean en agua.

Además, es difícil usar el enlace de hidrógeno para el ensamblaje de estructuras supramoleculares en el agua. En el etano como disolvente, una forma de vida hipotética podría ser capaz de utilizar más los enlaces de hidrógeno; tales enlaces tendrían la fuerza apropiada para la baja temperatura. Además, los hidrocarburos con grupos polares pueden ser hidrocarburo-fóbicos; la acetonitrila y el hexano,

⁵⁰ C. Sagan, W. R. Thompson y B. N. Khare, "Titan: A Laboratory for Prebiological Organic Chemistry", *Accounts of Chemical Research*, 25: 286-292, 1992.

⁵¹ D. S. Tawfik y A. D. Griffiths, "Man-Made Cell-like Compartments for Molecular Evolution", *Nature Biotechnology*, 16: 652-656, 1998.

por ejemplo, forman dos fases. Uno puede concebir una separación de fase líquido/líquido en el petróleo natural que pudiera lograr el aislamiento darwiniano.

La reactividad del agua significa que ésta destruye las especies orgánicas hidrolíticamente inestables. Así, una forma de vida hipotética que viviera en un océano de hidrocarburos de Titán no tendría que preocuparse tanto sobre la desaminación hidrolítica de sus nucleobases, y podría realizar la reactividad más fácilmente que la vida en el agua.

Esto lo saben bien los químicos orgánicos, quienes prefieren los disolventes no acuosos como medio para realizar reacciones orgánicas en el laboratorio, en vez del agua. Por ejemplo, en un número reciente del *Journal of Organic Chemistry* [Revista de Química Orgánica], los químicos utilizaron un disolvente que no era el agua para llevar a cabo sus reacciones más de 80% de las veces. Los químicos evitan el uso del agua como disolvente porque ésta es en sí misma reactiva y tiene tanto un oxígeno nucleofílico como un hidrógeno ácido en una concentración 55 molar. Así, los disolventes de hidrocarburos son mejores en muchos sentidos que el agua para controlar la reactividad química orgánica compleja.

Por lo tanto, en cuanto medio ambiente, Titán ciertamente cumple con todos los estrictos criterios para la vida antes expuestos. Titán no se encuentra en equilibrio termodinámico. Allí existen abundantes heteroátomos y moléculas que contienen carbono. La temperatura de Titán es lo suficientemente baja como para permitir una amplia gama de enlaces, covalentes y no covalentes. Titán indudablemente posee otros recursos que se consideran útiles en la catálisis necesaria para la vida, incluidos los metales y las superficies.

Todo lo anterior hace inevitable la conclusión de que si la vida es una propiedad intrínseca de la reactividad química, la vida tiene que existir en Titán. De hecho, para que la vida *no* exista en Titán, tendríamos que argumentar que la vida *no* es una propiedad intrínseca de la reactividad en condiciones de estabilidad de las moléculas que contienen carbono. Tendríamos que creer, ya sea que la vida es rara en esas condiciones, ya sea que hay algo especial, y mejor, en el medio ambiente de la Tierra (incluida su agua).

Disolventes que no son agua ni hidrocarburos

El compuesto más abundante en el Sistema Solar es el dihidrógeno, el principal componente (86%) de las regiones más altas de los gigantes de gas, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno. El otro componente principal de las regiones externas de

los planetas gigantes es el helio (0.14%). El resto lo integran componentes menores, como el metano ($2 \times 10^{-3}\%$), el agua ($6 \times 10^{-4}\%$), el amoníaco ($2.5 \times 10^{-4}\%$) y el sulfuro de hidrógeno ($7 \times 10^{-5}\%$), entre otros.

¿Pero es un líquido el dihidrógeno? Las propiedades físicas de una sustancia se describen mediante un diagrama de fases que relaciona el estado de una materia (sólida de varios tipos, líquida o gaseosa) con la temperatura y la presión. Una línea generalmente atraviesa el diagrama de las fases. Arriba de esta línea, la sustancia es un gas; debajo de la línea, la sustancia es un líquido. Por lo general, sin embargo, la línea termina en un punto crítico. Arriba del punto crítico, la sustancia es un fluido supercrítico, ni líquido ni gas. El cuadro XII.1 muestra las temperaturas y presiones críticas de algunas sustancias comunes en el Sistema Solar.

Las propiedades de los fluidos supercríticos generalmente son distintas a las de fluidos normales. Por ejemplo, el agua supercrítica es relativamente no polar y ácida. Además, las propiedades de un fluido supercrítico, tales como su densidad y su viscosidad, al irse acercando al punto crítico cambian de manera dramática con el cambio de la temperatura y de la presión.

La solvatación de los fluidos supercríticos cerca de su punto crítico se utiliza ampliamente en la industria.⁵² Por ejemplo, el bióxido de carbono supercrítico a una temperatura crítica de 304.2 K y una presión de 73.8 atm se utiliza para descafeinar el café. El agua supercrítica bajo la superficie de la Tierra propicia la formación de muchos de los atractivos cristales que se utilizan en la joyería.

CUADRO XII.1. *Temperatura y presión críticas para determinadas sustancias*

Líquido	Temperatura crítica (K)	Presión crítica (atm)
Hidrógeno	33.3	12.8
Neón	44.4	26.3
Nitrógeno	126.0	33.5
Argón	151.0	48.5
Metano	191.0	45.8
Etano	305.0	48.2
Bióxido de carbono	305.0	72.9
Amoníaco	406.0	112.0
Agua	647.0	218.0

⁵² B. C. Y. Lu, D. Zhang y W. Sheng, "Solubility Enhancement in Supercritical Solvents", *Pure Applied Chemistry*, 62: 2277-2285, 1990.

Poco se sabe del comportamiento de las moléculas orgánicas en un disolvente de dihidrógeno supercrítico. En los decenios de 1950 y 1960 varios laboratorios estudiaron la solubilidad de las moléculas orgánicas (por ejemplo, el naftaleno) en gases comprimidos, incluidos el dihidrógeno y el helio.⁵³ Sin embargo, ninguna de las situaciones examinadas en el laboratorio exploró altas presiones y temperaturas.

La mayor parte del volumen de los planetas gigantes de gas es un líquido supercrítico. Sin embargo, la temperatura de éste es demasiado alta para enlaces covalentes estables de carbono-carbono. Sin embargo, podemos definir dos radios en cada uno de los gigantes de gas. El primero es el radio donde el dihidrógeno se convierte en un fluido supercrítico. El segundo es el radio donde la temperatura se eleva hasta el punto donde las moléculas orgánicas ya no permanecen estables; para los efectos de esta discusión, elegimos el grado de 500 K. Si el segundo radio es más pequeño que el primero, entonces el gigante de gas posee una “zona habitable” para la vida en el dihidrógeno supercrítico. Pero si el segundo radio es más grande que el primero, entonces el planeta no posee una zona habitable.

Si existiera tal zona en Júpiter, sería estrecha. Donde la temperatura fuera de 300 K (adecuada para las moléculas orgánicas), la presión (cerca de ocho atmósferas) sería todavía subcrítica. Aproximadamente 200 km más abajo, la temperatura se eleva más arriba de 500 K, acercándose al límite superior donde los enlaces de carbono-carbono son estables.⁵⁴ En Saturno, Urano y Neptuno, sin embargo, la zona habitable parece ser más amplia (respecto al radio planetario). En Saturno, la temperatura en que el hidrógeno se hace supercrítico es aproximadamente 300 K. En Urano y Neptuno, la temperatura en que el hidrógeno se hace supercrítico es de sólo 160 K; a esta temperatura las moléculas orgánicas son estables.

Hay convección en las atmósferas de estos planetas. Para sobrevivir en Júpiter, una forma de vida hipotética con base en enlaces covalentes de carbono tendría que evitar ser trasladada por el proceso de convección a sitios en la atmósfera donde no sería posible su supervivencia. Esto es correcto, por supuesto, para cualquier forma de vida en un medio fluido, incluidos los océanos terrestres.

⁵³ W. W. Robertson y R. E. Reynolds, “Effects of Hydrostatic Pressure on the Intensity of the Singlet-Triplet Transition of 1-Chloronaphthalene in Ethyl Iodide”, *Journal of Chemical Physics*, 29: 138-141, 1958; A. D. King y W. W. Robertson, “Solubility of Naphthalene in Compressed Gases”, *Journal of Chemical Physics*, 37: 1453-1455, 1962.

⁵⁴ R. A. West, “Atmosphere of the Giant Planets”, en L. A. McFadden, P. R. Weissman y T. V. Johnson (comps.), *Encyclopædia of the Solar System*, vol. 2, Academic Press, San Diego, 1999, pp. 383-402.

C. Sagan y E. E. Salpeter presentan una discusión minuciosa de lo que sería necesario para un “flotador” a fin de permanecer estable en la atmósfera de Júpiter.⁵⁵

LA VIDA EN AMBIENTES SIMILARES AL TERRÁQUEO

Podrían existir en ambientes extraños formas de vida extrañas. Pero también podríamos preguntar si un modelo químico común existe en todas las formas de vida de los medios similares al de la Tierra. Aquí, el carbono es el andamiaje y el agua es el disolvente. Al limitar nuestra discusión a este medio ambiente convenimos con la opinión de la mayor parte de la bibliografía, que se inclina mucho a establecerlo como el necesario para la vida. Por lo tanto, en su búsqueda de los indicios de la vida en Marte, la NASA ha optado por seguir la pista del agua. Dado lo que sabemos, ésta parece ser una estrategia razonable.

EL AGUA COMO DISOLVENTE

El agua ciertamente parece ser necesaria para la vida terráquea, la cual aparentemente sólo puede vivir en las situaciones donde el agua es líquida. Así, los extremófilos que viven a una temperatura de más de 373 K en el fondo del océano sólo pueden hacerlo porque las altas presiones mantienen el agua en estado líquido allí. Las bacterias en el hielo de la Antártica presumiblemente necesitan el descongelamiento para crecer.⁵⁶

A fin de probar la hipótesis de que el agua es necesaria para la vida, se podrían investigar los lugares en la Tierra que carecen de agua para ver si adaptándose a esos medios la vida ha evolucionado. McKay y sus colegas han buscado la vida minuciosamente en el desierto de Atacama, uno de los lugares más secos de la Tierra.⁵⁷ Han llegado a la conclusión de que la vida allí es muy escasa; las inves-

⁵⁵ C. Sagan y E. E. Salpeter, “Particles, Environments, and Possible Ecologies in the Jovian Atmosphere”, *Astrophysics Journal*, 32: 737-755, 1976.

⁵⁶ J. Laybourn-Parry, “Survival Mechanisms in Antarctic Lakes”, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 357: 863-869, 2002; K. Junge, H. Eicken y J. W. Deming, “Motility of *Colwellia psychrerythraea* Strain 34H at Subzero Temperatures”, *Applied Environmental Microbiology*, 69: 4282-4284, 2003; K. Junge, H. Eicken y J. W. Deming, “Bacterial Activity at -2 to -20 Degrees C in Arctic Wintertime Sea Ice”, *Applied Environmental Microbiology*, 70: 550-557, 2004.

⁵⁷ R. Navarro-González *et al.*, “Mars-like Soils in the Atacama Desert, Chile, and the Dry Limit of Microbial Life”, *Science*, 392 (5647): 1018-1021, 2003.

tigaciones con base en la PCR (reacción en cadena de la polimerasa) no lograron detectar biofirmas terráqueas típicas, y la cantidad de cultivos a partir de las muestras del área más seca es casi o totalmente insignificante.

Prácticamente todos los medios de la Tierra que han sido examinados, desde los pozos mineros más profundos hasta las profundidades de los mares, en los hábitats donde predominan reductores tan fuertes como el sulfuro de hidrógeno y el metano, u oxidantes tan fuertes como el dióxígeno, albergan formas de vida que han evolucionado a partir del ancestro universal de toda la vida en la Tierra. Siempre que haya agua, la vida encontrará una manera de explotar cualquier tipo de desequilibrio termodinámico que pueda existir.⁵⁸

Estas experiencias sugieren que la vida terráquea necesita el agua. Pero todavía podemos preguntar si el agua es específicamente necesaria para la vida, o si el ejemplo del desierto de Atacama simplemente muestra que *algún tipo* de disolvente es necesario (ya que no existe en Atacama ningún otro tipo de disolvente). Una vez más, carecemos de la información experimental en apoyo de una opinión en un sentido o en otro. Pero las propiedades del agua son bien conocidas y por lo menos podemos preguntar si el agua nos proporciona un modelo químico común para la vida.

VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL AGUA

Gran parte de la bibliografía en este campo comenta las propiedades del agua que la hacen muy adecuada para la vida. Podemos establecer, para cada una de estas propiedades, una dialéctica de “buena noticia/mala noticia”.

Por ejemplo, el agua se expande al congelarse. Esto es útil para procesar las rocas y convertirlas en tierra. La expansión también significa que el hielo flota, permitiéndole al hielo de la superficie aislar térmicamente el agua líquida que está debajo, la cual podría albergar la vida en un planeta superficialmente congelado. El amoníaco y el metano son más densos como sólidos que como líquidos, y por lo tanto se encogen al congelarse, exponiendo la superficie líquida a más congelamiento.

⁵⁸ T. Gold, “The Deep, Hot Biosphere”, *Proceedings of the National Academy of Science*, 89: 6045-6049, 1992; K. Pedersen, “The Deep Subterranean Biosphere”, *Earth-Science Review*, 34: 243-260, 1992; T. O. Stevens, “Subsurface Microbiology and the Evolution of the Biosphere”, en P. S. Amy y D. L. Halderman (comps.), *Microbiology of the Terrestrial Deep Subsurface: Microbiology of Extreme and Unusual Environments*, Chemical Rubber Company Press, Boca Raton, 1997, pp. 205-224.

Otro aspecto del agua líquida es el efecto hidrofóbico, descrito por la observación empírica de que el agua y el aceite no se mezclan. Es una manifestación del hecho de que el agua forma enlaces más fuertes de hidrógeno con otras moléculas de agua que con las moléculas de aceite. El efecto hidrofóbico es la clave de la formación de membranas, las cuales a su vez sustentan las estrategias del aislamiento en la vida terráquea. Similarmente, las proteínas al doblarse guardan sus aminoácidos hidrofóbicos en su interior, resguardados del agua.

Por otra parte, el agua también participa en reacciones indeseables. Así, la citidina se desamina hidrolíticamente, produciendo la uridina, la cual tiene una vida media de cerca de 70 años en el agua a 300 K.⁵⁹ La adenosina se desamina hidrolíticamente (en inosina), la guanosina se desamina hidrolíticamente en xantosina, y ambas tienen una vida media ligeramente mayor. Consecuentemente, el ADN terráqueo en agua debe repararse continuamente. La toxicidad del agua crea problemas especiales para la química prebiótica, ya que los mecanismos de reparación supuestamente requieren un sistema viviente.

LAS RESTRICCIONES UNIVERSALES PARA LA VIDA EN EL AGUA

El agua también constriñe la estructura de las biomoléculas que contienen carbono y su subsecuente metabolismo. Mínimamente, para que la vida explote el poder del agua como disolvente, muchas biomoléculas deben ser solubles en agua. Ésta es la explicación más sencilla de la prevalencia de grupos hidroxilo en las moléculas orgánicas que son centrales en el metabolismo biológico. La glucosa tiene cinco y se disuelve bien en el agua.

La carga también ayuda a la disolución en el agua. Muchos de los intermediarios en el metabolismo terráqueo están fosforilados, lo cual les da cargas que incrementan su disolución en el agua. El ciclo del ácido cítrico se basa en ácidos tricarboxílicos y dicarboxílicos. Éstos se ionizan en pH fisiológico, lo cual los hace solubles en el agua.

El ADN, la molécula central en la evolución darwiniana de la Tierra, muestra la importancia de la solubilidad.⁶⁰ El ADN dúplex, donde un polianión se enlaza con otro polianión, al parecer no obedece la ley de Coulomb. Uno podría pensar

⁵⁹ L. Frick, J. P. McNeela y R. Wolfenden, "Transition State Stabilization by Deaminases: Rates of Nonenzymatic Hydrolysis of Adenosine and Cytidine", *Bioorganic Chemistry*, 15: 100-108, 1987.

⁶⁰ F. H. Westheimer, "Why Nature Chose Phosphates", *Science*, 235: 1173-1178, 1978.

(y de hecho, muchos han pensado)⁶¹ que el dúplex sería más estable si una hebra no tuviera carga, o fuera policationica.⁶²

Son muchos los esfuerzos que se han hecho por crear análogos no iónicos del ADN y el ARN.⁶³ Por ejemplo, la sustitución del enlace diéster de fosfato aniónico por el enlace de carga negativa de dimetilsulfona genera análogos de ADN y ARN que son isómeros irregulares del análogo de fosfato (figura XII.5).⁶⁴ Los análogos cortos de ADN con enlaces de sulfona (los SNA) muestran un reconocimiento molecular del tipo Watson-Crick.⁶⁵ En las oligosulfonas más largas, sin embargo, la pérdida de la carga repetida daña el reconocimiento molecular basado en reglas.⁶⁶ Además, los SNA que se diferenciaban por sólo una nucleobase muestran diferentes niveles de solubilidad, agregación, doblamiento y reactividad química.⁶⁷

Estos resultados sugieren tres hipótesis para explicar por qué los enlaces de fosfato cargados positivamente son importantes en el reconocimiento molecular del ADN. Primero, las cargas repetidas en el espinazo obligan a las interacciones entre las hebras a separarse del espinazo, y causan el contacto de las hebras en el borde Watson-Crick de los heterociclos (figura XII.6). Sin el espinazo polianiónico, los contactos entre las hebras pueden darse en cualquier parte.⁶⁸ Luego, las

⁶¹ K. Jayaraman *et al.*, "Non Ionic Oligonucleoside Methylphosphonates 4: Selective-Inhibition of *Escherichia coli* Protein-Synthesis and Growth by Non-Ionic Oligonucleotides Complementary to the 3' End of 16S Ribosomal-rRNA", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 78: 1537-1541, 1981; P. S. Miller *et al.*, "Biochemical and Biological Effects of Nonionic Nucleic Acid Methylphosphonates", *Biochemistry*, 20: 1874-1880, 1981.

⁶² P. M. Reddy y T. C. Bruice, "Solid-phase Synthesis of Positively Charged Deoxynucleic Guanidine (DNG) Oligonucleotide Mixed Sequences", *Biorganic and Medicinal Chemistry Letters*, 13: 1281-1285, 2003; B. A. Linkletter, I. E. Szabo y T. C. Bruice, "Solid-Phase Synthesis of Oligopurine Deoxynucleic Guanidine (DNG) and Analysis of Binding with DNA Oligomers", *Nucleic Acids Research*, 29: 2370-2376, 2001.

⁶³ P. S. Miller *et al.*, *op. cit.*

⁶⁴ S. A. Benner y D. Hutter, "Phosphates, DNA, and the Search for Nonterran Life. A Second Generation Model for Genetic Molecules", *Bioorganic Chemistry*, 30: 62-80, 2002; Z. Huang, K. C. Schneider y S. A. Benner, "Building Blocks for Oligonucleotide Analogs with Dimethylene-Sulfide, -Sulfoxide and -Sulfone Groups Replacing Phosphodiester Linkages", *Journal of Organic Chemistry*, 56: 3869-3882, 1991; Z. Huang, K. C. Schneider y S. A. Benner, "Oligonucleotide Analogs with Dimethylene-Sulfide, -Sulfoxide and -Sulfone Groups Replacing Phosphodiester Linkages", *Methods in Molecular Biology*, 20: 315-353, 1993.

⁶⁵ A. L. Roughton *et al.*, "Crystal Structure of a Dimethylene-Sulfone-Linked Ribonucleotide Analog", *Journal of the American Chemical Society*, 117: 7249-7250, 1995.

⁶⁶ C. Richert, A. L. Roughton y S. A. Benner, "Nonionic Analogs of RNA with Dimethylene Sulfone Bridges", *Journal of the American Chemical Society*, 118: 4518-4531, 1996.

⁶⁷ J. G. Schmidt, B. Eschgfäller y S. A. Benner, "A Direct Synthesis of Nucleoside Analogs Homologates at the 3' and 5' Positions", *Helvetica Chimica Acta*, 86: 2957-2997, 2003; B. Eschgfäller, J. G. Schmidt y S. A. Benner, "Synthesis and Properties of Oligodeoxynucleotide Analogs with Bis(methylene) Sulfone-Bridges", *Helvetica Chimica Acta*, 86: 2937-2957, 2003.

⁶⁸ C. Steinbeck y C. Richert, "The Role of Ionic Backbones in RNA Structure: An Unusually Stable

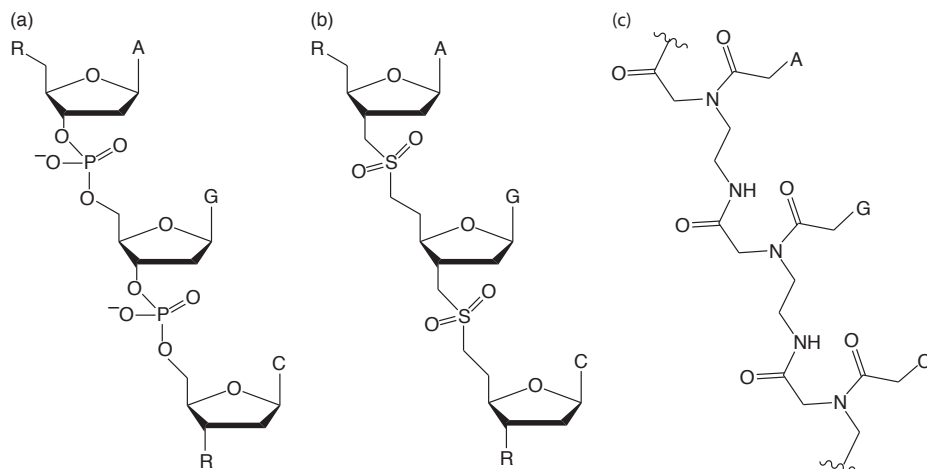


FIGURA XII.5. La sustitución de (a) el enlace diéster de fosfato aniónico por (b) el enlace de carga negativa de dimetilsulfona genera análogos de ADN y ARN que son isómeros irregulares del análogo de fosfato. (c) El ácido nucleico peptídico (ANP) es un imitador de ADN/ARN, en el cual el espinazo de fosfato-azúcar ha sido sustituido por enlaces no cargados de N-(2-aminoetil)glicina con las nucleobases unidas mediante enlaces de metileno carbonilo con el grupo amino de la glicina. © Current Opinion in Chemical Biology.

cargas repetidas en el espinazo impiden que se doblen las hebras del ADN. Es más probable que un polianión flexible adopte una configuración extendida adecuada para servir como template, a que lo haga un polímero neutral flexible, el cual es más probable que se doble.⁶⁹

Finalmente, las cargas repetidas del espinazo permiten que el ADN sustente la evolución darwiniana. Como se observó antes, la replicación no es suficiente para que una molécula genética sustente la evolución darwiniana. El sistema darwiniano también debe generar replications inexactas, descendientes cuya estructura química sea diferente de la de sus padres. Estas diferencias entonces deberán ser ellas mismas replicables. Aunque se conocen bien en la química los sistemas autorreplicadores, no se conocen aquellos que generan copias inexactas cuya inexactitud es ella misma replicable.⁷⁰ De hecho, los cambios pequeños en la estructura molecular con frecuencia causan cambios grandes en las propiedades

Non-Watson-Crick Duplex of a Nonionic Analog in an Apolar Medium”, *Journal of the American Chemical Society*, 120: 11576-11580, 1998.

⁶⁹ P. J. Flory, *Principles of Polymer Chemistry*, Cornell University Press, Nueva York, 1953.

⁷⁰ D. H. Lee *et al.*, “A Self-replicating Peptide”, *Nature*, 382: 525-528, 1996.

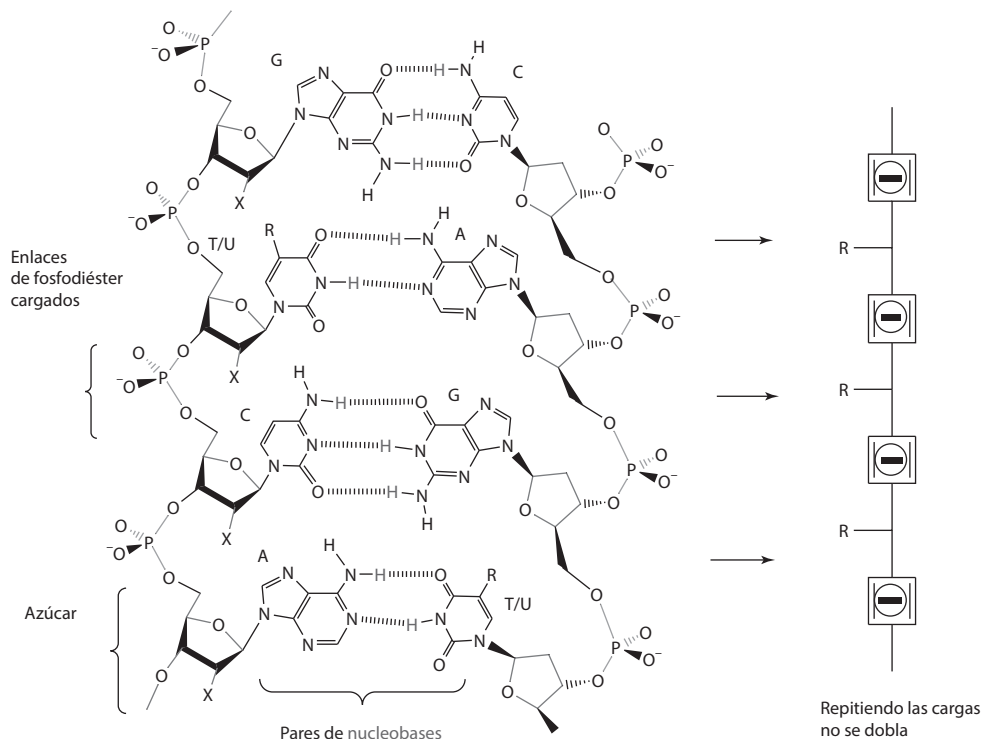


FIGURA XII.6. Las cargas repetidas en el espinazo obligan a las interacciones entre las hebras a separarse del espinazo y causan el contacto de las hebras en el borde Watson-Crick de los heterociclos. Sin el espinazo polianiónico, los contactos entre las hebras podrían darse en cualquier lugar. © Current Opinion in Chemical Biology.

físicas de un sistema. Esto significa que las réplicas inexactas no necesariamente tienen que conservar las propiedades físico-químicas generales de sus ancestros, propiedades que son esenciales en la replicación.

En el ADN, el espinazo polianiónico domina las propiedades físicas del ADN. La sustitución de una nucleobase por otra, por lo tanto, sólo tiene un impacto secundario en el comportamiento físico de la molécula. Esto permite que las nucleobases sean sustituidas durante la evolución darwiniana sin que pierdan las propiedades que son esenciales en la replicación.

Por esta razón, una carga repetida puede ser un aspecto estructural universal de cualquier molécula genética que sustente la evolución darwiniana en el agua.⁷¹

⁷¹ S. A. Benner y D. Hutter, *op. cit.*

Sin embargo, los espinazos policatiónicos pueden ser tan adecuados como los espinazos polianiónicos.⁷² Por lo tanto, si se detecta la vida en el agua en otros planetas, su genética probablemente se basará en espinazos polianiónicos o policatiónicos, aun si sus nucleobases son diferentes de las que se encuentran en la Tierra. Este aspecto estructural puede detectarse fácilmente mediante sencillos dispositivos analíticos.

EL DIPOLO REPETIDO COMO ASPECTO ESTRUCTURAL UNIVERSAL DE LOS CATALIZADORES EN EL AGUA

Como se señaló antes, no es necesario que sean universales los 20 aminoácidos específicos que son comunes en las proteínas terráneas estándar. ¿Pero qué sucede con el espinazo de la amida? A diferencia del ADN y el ARN, donde el elemento repetido es un monopolo (una carga), el elemento repetido en una cadena polipéptida es un dipolo. Esto es lo ideal para el plegamiento; el extremo positivo de un dipolo interactúa favorablemente con el extremo negativo de otro dipolo. En comparación, un biopolímero basado en un enlace éster repetido no se doblaría mediante interacciones espinazo-espinazo (figura XII.7). Ya que el plegamiento es casi absolutamente necesario para una catálisis eficiente, uno podría esperar que los dipolos repetidos, tal como se encuentran en las poliamidas, existieran a lo largo de la galaxia en las biosferas basadas en el agua.

Los aminoácidos aparentemente son producto de la síntesis prebiótica. Además, pueden existir en los meteoritos carbonáceos, ya sea como los α -aminoácidos que son estándar en la vida terránea, o como los α -metilo-aminoácidos descubiertos por Cronin y Pizzarello,⁷³ que no son estándar.

La unicidad del enlace entre el carbono, el oxígeno y el nitrógeno hace difícil concebir un espinazo alternativo que contenga un dipolo repetido. Si se hiciera una selección en la tercera fila de la tabla periódica, la sulfonamida repetida ciertamente sería una posibilidad (figura XII.7).⁷⁴ Las fosfonamidas, donde la carga negativa se halla bloqueada, representarían otra alternativa.⁷⁵

⁷² P. S. Miller *et al.*, *op. cit.*; P. M. Reddy y T. C. Bruice, *op. cit.*

⁷³ J. R. Cronin y S. Pizzarello, "Amino-Acids of the Murchison Meteorite II: Seven Carbon Acidic Primary Alpha-Amino Alkanoic Acids", *Geochimica et Cosmoquímica Acta*, 50: 2419-2427, 1986.

⁷⁴ J. M. Ahn *et al.*, "Peptidomimetics and Peptide Backbone Modifications", *Mini Reviews in Medicinal Chemistry*, 2: 463-473, 2002.

⁷⁵ K. Yamauchi, Y. Mitsuda y M. Kinoshita, "Peptides Containing Aminophosphonic Acids III. The Synthesis of Tripeptide Analogs Containing Aminomethylphosphonic Acid", *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 48: 3285-3286, 1975.

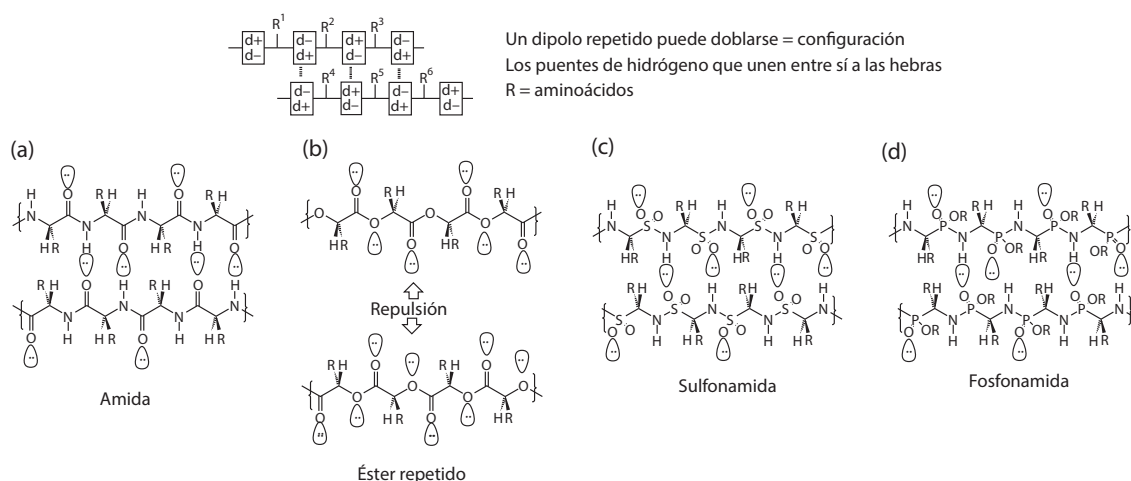


FIGURA XII.7. Un dipolo repetido (amida) en los polipéptidos es ideal para el plegamiento en el agua. (a) La poliamida que se encuentra en las proteínas naturales. (b) En cambio, un enlace poliéster no se dobla. Si seleccionamos elementos de la tercera fila de la tabla periódica, (c) la sulfonamida repetida ciertamente sería una posibilidad, y (d) una fosfonamida repetida donde se ha cancelado la carga del fosfato (como en un fosfodiéster) sería otra.

© Current Opinion in Chemical Biology.

ASPECTOS ESTRUCTURALES UNIVERSALES DE LOS METABOLITOS EN EL AGUA

La fuerza del enlace carbono-carbono, valiosa en el enlace covalente, se convierte en una desventaja en el caso del metabolismo. El enlace entre dos átomos de carbono no se rompe a temperaturas en que el agua es líquida, a menos que tenga un motivo para hacerlo. En particular, un reactante debe estar estructurado de tal manera que el par de electrones que forma el enlace entre dos átomos de carbono tenga un lugar adonde ir que no sea el carbono mismo. En el metabolismo terráqueo moderno, los electrones por lo general se desplazan, directa o indirectamente, al átomo de oxígeno que da inicio a la reacción enlazado doblemente a un átomo de carbono. El grupo (carbonilo) $C=O$ es central en todo el metabolismo contemporáneo terráqueo.

Otros átomos se pueden enlazar doblemente al carbono y pueden generar una reactividad similar. Por ejemplo, el nitrógeno doblemente enlazado al carbono sustenta gran parte de la misma química. En el agua, la unidad (imina) $C=N$

se hidroliza rápidamente, dando una amina y un producto con carbonilo que contiene un $C = O$ en la posición correspondiente. Por lo tanto, en la bioquímica moderna terráquea la imina es una especie transitoria en muchas reacciones químicas, incluso aquellas que ocurren en un lugar activo de la enzima. Un buen ejemplo de esto es la química piridoxal.

PROBLEMAS UNIVERSALES EN EL AGUA

Muchas moléculas orgánicas que forman parte, casi inevitablemente, de un metabolismo basado en el carbono, muestran una reactividad problemática en el agua. La vida que no se libra de estas moléculas tiene que lidiar con su reactividad.

Por ejemplo, el bióxido de carbono es una clave del ciclo del carbono en cualquier medio moderadamente oxidante. Sin embargo, el agua y el bióxido de carbono forman un par problemático. El carbono del bióxido de carbono es un buen centro electrofílico. Pero el bióxido de carbono mismo se disuelve mal en el agua (0.88 v/v a 293 K y 1 atm), y se disuelve con pH 7 como un anión de bicarbonato. Sin embargo, el grupo aniónico carboxilato escuda su centro electrofílico. Esto significa que el bicarbonato, en cuanto electrofílico, es intrínsecamente no reactivo. Por lo tanto, el metabolismo del bióxido de carbono se queda atrapado en un dilema. La forma reactiva no es soluble; la forma soluble no es reactiva.

El metabolismo terráqueo se ha esforzado mucho para resolver este dilema. La reactividad del cofactor biotina se discutió en este contexto hace casi tres decenios.⁷⁶ La biotina es metabólicamente muy cara y no se puede usar para controlar el bióxido de carbono y su problemática reactividad en grandes cantidades. La enzima ribulosa bifosfato carboxilasa intenta controlar el problema sin la biotina. Pero aquí, la problemática reactividad del bióxido de carbono compite con la problemática reactividad del dióxígeno. Incluso en las plantas muy avanzadas, una fracción sustancial del sustrato que se utiliza para captar el bióxido de carbono queda destruida mediante la reacción con el dióxígeno.⁷⁷ La vida terráquea, en casi 1 000 millones de años, no ha encontrado una solución convincente de este problema, que bien puede ser universal. En efecto, si llegamos a encontrar formas de vida no terráqueas basadas en el carbono, será interesante

⁷⁶ C. M. Visser y R. M. Kellog, "Biotin: Its Place in Evolution", *Journal of Molecular Evolution*, 11: 171-178, 1978.

⁷⁷ W. L. Ogren y G. Bowes, "Oxygen Inhibition and Other Properties of Soybean Ribulose 1,5-Diphosphate Carboxylase", *Journal of Biological Chemistry*, 247: 2171-2176, 1972.

ver cómo han logrado controlar las infortunadas propiedades del bióxido de carbono.

LAS NUCLEOBASES DEL ADN COMO ILUSTRACIÓN DE LA TRIALÉCTICA

Las cuatro nucleobases estándar terráqueas forman pares conforme a reglas sencillas (A se aparea con T, G se aparea con C). Estos pares, a su vez, obedecen dos leyes de complementariedad: la complementariedad del tamaño (las purinas grandes se aparean con las pirimidinas pequeñas), y la complementariedad del enlazamiento del hidrógeno (los donantes de enlaces de hidrógeno se aparean con los aceptores de enlaces de hidrógeno; figura XII.8). Esta perspectiva muestra que 12 letras que formarían seis pares de bases mutuamente excluyentes serían posibles en la geometría Watson-Crick, y acatarían la complementariedad del tamaño y del enlazamiento del hidrógeno.⁷⁸ Se han sintetizado ejemplos representativos de cada uno de los pares, y en efecto se ha observado un apareamiento de bases que acata una serie ampliada de las reglas Watson-Crick del apareamiento de bases. Las letras adicionales en el alfabeto genético artificial son útiles. Hoy se utilizan en las pruebas de diagnóstico clínico aprobadas por la FDA [Food and Drug Administration] que monitorean los virus del VIH y de la hepatitis C en cerca de 400 000 pacientes anualmente.⁷⁹ El alfabeto genético ampliado también funciona con la reacción en cadena de la polimerasa,⁸⁰ posibilitando así la evolución darwiniana con una molécula genética no terráquea.

Dado que estas dos reglas de la complementariedad tienen un valor constructivo en la creación de sistemas genéticos artificiales bajo condiciones acuosas terráqueas, acaso también lo tendrían en condiciones extremas. Consideremos, por ejemplo, el problema de la genética con un pH bajo. La adenina es medio protonada con un pH 3.88; la citidina es medio protonada con un pH 4.56. La protonación cambia los patrones de enlazamiento de hidrógeno de estas nucleobases, trastornando el apareamiento Watson-Crick que mantiene la unión de la doble hélice. Por lo tanto, estas nucleobases no sustentarían la vida en condiciones de pH bajo, tal como las que existen en la atmósfera venusina.

⁷⁸ S. A. Benner, "Understanding Nucleic Acids Using Synthetic Chemistry", *Accounts of Chemical Research*, 37: 794-797, 2004.

⁷⁹ T. Elbeik *et al.*, "Multicenter Evaluation of the Performance Characteristics of the Bayer VERS ANT HCV RNA 3.0 assay (bDNA)", *Journal of Clinical Microbiology*, 42: 563-569, 2004.

⁸⁰ A. M. Sismour *et al.*, "PCR Amplification of DNA Containing Non-Standard Base Pairs by Variants of Reverse Transcriptase from Human Immunodeficiency Virus-1", *Nucleic Acids Research*, 32 (2): 728-735, 2000.

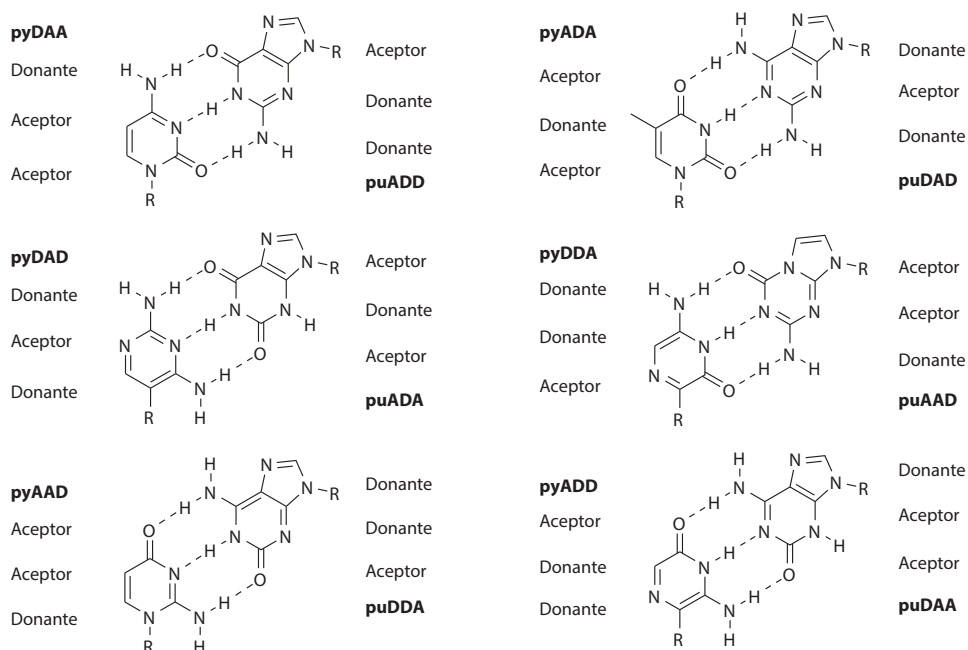


FIGURA XII.8. Alfabeto genético expandido.

De acuerdo con las leyes de complementariedad del tamaño (las purinas grandes se unen con las pirimidinas pequeñas), y de la complementariedad del enlazamiento del hidrógeno (los donantes de enlaces de hidrógeno de un par de nucleobases se aparean con los aceptores de enlaces de hidrógeno de otro), las cuatro nucleobases terráqueas son una minoría de entre las 12 letras que pueden formar pares de bases mutuamente excluyentes posibles en la geometría Watson-Crick. © Current Opinion in Chemical Biology.

Reflejando esta situación, los organismos terráqueos modernos que viven en condiciones de bajo pH (se conocen potenciales de H tan bajos como 0)⁸¹ liberan protones a fin de mantener un pH intracelular muy arriba del pK_a de las nucleobases protonadas. Sin embargo, podrían modificar la estructura de las nucleobases a fin de modificar su basicidad. Por ejemplo, 5-nitrocitidina tiene un pK_a que debería ser considerablemente más bajo que el de la citidina.

¿Por qué han optado por liberar protones los organismos terráqueos que viven en condiciones de bajo pH, en vez de modificar las nucleobases de su ADN? Una explicación funcional sostendría que la adecuación perdida por la necesidad

⁸¹ K. J. Edwards *et al.*, "An Archaeal Iron-Oxidizing Extreme Acidophile Important in Acid Mine Drainage", *Science*, 287: 1796-1799, 2000.

de liberar protones es menor que la adecuación perdida por la biosíntesis de nucleobases alternativas. Una explicación basada en la vestigialidad acepta que la sustitución de la citidina por la 5-nitrocitidina efectivamente podría generar un organismo más apto, pero que la vida que invadió los medios de bajo pH tenía citidina, no 5-nitrocitidina, junto con el metabolismo para generarla y degradarla, las polimerasas para copiarla, y la biología molecular para utilizarla. No fue posible cambiar todo esto utilizando los procesos darwinianos.

Una discusión análoga tiene que ver con la ribosa en el ARN terráqueo.⁸² La evidencia de un “mundo del ARN”, un episodio de la vida en la Tierra en que el ARN era el único componente genéticamente codificado de los catalizadores biológicos,⁸³ se halla presente en el ribosoma,⁸⁴ en las moléculas de ARN catalíticas,⁸⁵ y en fragmentos de ARN del metabolismo contemporáneo.⁸⁶ Muchos han dudado, sin embargo, que las primeras formas de la vida usaran el ARN como su material genético.⁸⁷ Esta duda surge en parte por el hecho de la inestabilidad química de la ribosa en el agua.⁸⁸

La ribosa puede hacerse abiológicamente. Cuando se incuban con hidróxido de calcio técnico, el formaldehído y el glicolaldehído (ambos existen en el medio interestelar)⁸⁹ se convierten en pentosas, incluida la ribosa, mediante una transformación conocida como la reacción de formosa.⁹⁰ Infortunadamente, la ribosa

⁸² W. M. Freier y K. H. Altmann, “The Ups and Downs of Nucleic Acid Duplex Stability: Structure-Stability Studies on Chemically-Modified DNA: ARN Duplexes”, *Nucleic Acids Research*, 25: 4429-4443, 1997, en especial p. 4429.

⁸³ W. Gilbert, “Origin of Life: The RNA World”, *Nature*, 319: 618, 1986.

⁸⁴ N. Ban *et al.*, “The Complete Atomic Structure of the Large Ribosomal Subunit at 2.4 Angstrom Resolution”, *Science*, 289: 905-920, 1986.

⁸⁵ K. Kruger *et al.*, “Self-splicing RNA: Autoexcision and Autocyclization of the Ribosomal RNA Intervening Sequence of Tetrahymena”, *Cell*, 31: 147-157, 1982; C. Guerrier-Takada *et al.*, “The RNA Moiety of Ribonuclease P is the Catalytic Subunit of the Enzyme”, *Cell*, 35: 849-857, 1983; D. P. Bartel y J. W. Szostak, “Isolation of New Ribozymes from a Large Pool of Random Sequences”, *Science*, 261: 1411-1418, 1993.

⁸⁶ S. A. Benner, A. D. Ellington y A. Tauer, “Modern Metabolism as a Palimpsest of the RNA World”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 86: 7054-7058, 1989.

⁸⁷ R. Shapiro, “Prebiotic Ribose Synthesis: A Critical Analysis”, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 18: 71-85, 1988.

⁸⁸ R. Larralde, M. P. Robertson y S. L. Miller, “Rates of Decomposition of Ribose and Other Sugars: Implications for Chemical Evolution”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 92: 8158-8160, 1995.

⁸⁹ J. M. Hollis *et al.*, “Interstellar Glycolaldehyde: The First Sugar”, *Astrophysics Journal*, 540 (2): L107-L110, 2000; J. M. Hollis, F. J. Lovas y P. R. Jewell, “The Spatial Scales of Glycolaldehyde in the Galactic Center”, *Astrophysics Journal*, 554: L81-L85, 2001.

⁹⁰ A. Butlerow, “Bildung einer zuckerartigen Substanz durch Synthese”, *Annalen*, 120: 295-298, 1864; R. Breslow, “On the Mechanism of the Formosa Reaction”, *Tetrahedron*, 21: 22-26, 1959.

rápidamente se degrada en estas condiciones. La treosa, que se ha explorado como alternativa de la ribosa,⁹¹ también se degrada.

A fin de solucionar el problema de la estabilidad, se han propuesto los fosfatos de ribosa.⁹² Además, los boratos estabilizan la ribosa bajo las condiciones en que ésta se forma.⁹³ El boro es un elemento poco común en la Tierra. Sin embargo, el bórax se excluye en muchos minerales de silicato y se enriquece en las condiciones ígneas. Además, el boro se encuentra más concentrado en la corteza que en el manto. Así, los sedimentos pueden contener tanto como 100–150 ppm de boro,⁹⁴ y su presencia en los volcanes de subducción se ve como una evidencia del origen de éstos. El boro también se presenta como turmalina en las rocas ígneas de la superficie. Los boratos de minerales alcalinos son bien conocidos en la Tierra. La serpentinización de la olivina en las rocas del manto genera soluciones alcalinas.⁹⁵ Los procesos de erosión del tiempo disuelven el bórax, llevándolo a los océanos y a las evaporitas.⁹⁶

La síntesis prebiótica de los azúcares hoy se examina con renovado interés. Las mezclas de aminoácidos no racémicos y de los complejos de zinc-prolina actúan como catalizadores asimétricos durante la condensación del glicoaldehído y del formaldehído.⁹⁷ Se ha demostrado que es posible precipitar selectivamente la ribosa mediante una reacción de derivación con la cianamida. Cuando las mezclas racémicas de D- y L-ribosa se hicieron reaccionar con la cianamida, se pudieron observar cristales puros que contenían dominios homquirales.⁹⁸ Estos recientes descubrimientos hacen que sea plausible el papel vestigial de la ribosa en el origen de la vida.

⁹¹ K. U. Shöning *et al.*, “Chemical Etiology of Nucleic Acid Structure: α -Threofuranosyl- (3'-2') Oligonucleotide System”, *Science*, 290: 1347-1351, 2000.

⁹² R. Krishnamurthy, G. Arrhenius y A. Eschenmoser, “Formation of Glycolaldehyde Phosphate from Glycolaldehyde in Aqueous Solution”, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 29: 333-354, 1999.

⁹³ A. Ricardo *et al.*, *op. cit.*

⁹⁴ J. G. Ryan *et al.*, “The Boron Systematics of Intraplate Lavas: Implications for Crust and Mantle Evolution”, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 415-422, 1996.

⁹⁵ J. B. Moody, “Serpentinization”, *Lithos*, 9: 125-138, 1976.

⁹⁶ T. Kawakami, “Tourmaline Breakdown in the Migmatite Zone of the Ryoke Metamorphic Belt, SW Japan”, *Journal of Metamorphic Geology*, 19: 61-75, 2001.

⁹⁷ S. Pizzarello y A. L. Webber, “Prebiotic Amino Acids as Asymmetric Catalysts”, *Science*, 303: 1151, 2004; J. Kofoed *et al.*, “Zinc-Proline Catalyzed Pathway for the Formation of Sugars”, *Chemical Communications*, 13: 1540-1541, 2004.

⁹⁸ G. Springsteen y G. F. Joyce, “Selective Derivatization and Sequestration of Ribose from a Prebiotic Mix”, *American Chemical Society*, 126: 9578-9583, 2004.

LA VIDA NO TERRÁQUEA EN LA TIERRA

¿Existe una biosfera alternativa en la Tierra? Esta pregunta no es tan absurda como pudiera parecer. Hace sólo 50 años todavía no se había descubierto el dominio Archaea. No se conocía la vida en las profundidades del océano. Ya que no son cultivables más de 90% de los microorganismos, no podemos excluir la posibilidad de que en la Tierra exista una forma de vida que aún no conocemos. De hecho, mientras se elaboraba este manuscrito un nuevo gusano macroscópico multicelular que se alimenta de los cadáveres de ballenas fue descubierto en el océano Pacífico a una profundidad de poco más de tres kilómetros.⁹⁹

Esta pregunta puede abordarse desde dos ángulos. Primero, podemos preguntar si es posible que una forma de vida cuya existencia muchos creen que fue realmente posible aún permanece en la Tierra. La hipótesis actual más firme respecto a la historia natural de la vida propone que ésta se inició como parte del mundo del ARN, como un sistema químico capaz de experimentar la evolución darwiniana y que utilizó el ARN como el único componente codificado de la catálisis biológica.¹⁰⁰ Podríamos preguntar: ¿siguen existiendo en la Tierra los organismos de ARN?

¿No es obvio que ya los hubiéramos encontrado si realmente existieran aquí? Primero, prácticamente todas las búsquedas “universales” de la vida se enfocan en el ribosoma, una molécula que fabrica proteínas codificadas. El ribosoma, casi por definición, no se presenta en los organismos de ARN.

¿Dónde se podrían encontrar en la Tierra los medios en que los organismos de ARN tuvieran una ventaja selectiva, y por lo tanto pudieran haber sobrevivido a 2 000 millones de años de competencia con la vida basada en las proteínas? Tres ideas vienen a la mente. Primero, el polímero codificado del ARN no requiere azufre; las proteínas, sí. Los organismos de ARN por lo tanto podrían sobrevivir en un medio ambiente donde el azufre se hubiera agotado totalmente.

Por otro lado, cerca de 70% del volumen de un organismo típico de tres polímeros basado en las proteínas lo ocupa la maquinaria de traducción que es necesaria para hacer proteínas. Un organismo de ARN no requiere esta maquinaria. Por lo tanto, los organismos de ARN pueden ser mucho más pequeños que los or-

⁹⁹ G. W. Rouse, S. K. Goffredi y R. C. Vrijenhoek, “Osedax: Bone Eating Marine Worms with Dwarf Males”, *Science*, 305: 668-671, 2004.

¹⁰⁰ W. Gilbert, *op. cit.*; J. D. Watson *et al.*, *Molecular Biology of the Gene*, Benjamin Cummins, Menlo Park, 1987, p. 1115.

ganismos basados en las proteínas.¹⁰¹ Esto sugiere que podríamos buscar los organismos de ARN en la Tierra mediante la búsqueda de ambientes en espacios mínimos. Muchos minerales tienen poros cuyo diámetro es menor a un micrón. Estos poros podrían albergar organismos de ARN aún más pequeños.

El ARN también se desnaturaliza y luego se pliega más fácilmente, en comparación con las proteínas. Esto podría crear un nicho para un organismo de ARN en ambientes que oscilarían entre temperaturas muy altas y muy bajas.

CONCLUSIONES

Este resumen sugiere que la vida podría existir en una amplia gama de ambientes. Éstos incluyen los sistemas de disolventes no acuosos y bajas temperaturas (condiciones que existen en la luna Titán de Saturno). La vida podría incluso existir en medios más exóticos, tales como las mezclas supercríticas de dihidrógeno-helio que se encuentran en los gigantes de gas. Nosotros proponemos que los únicos requisitos absolutos son el desequilibrio termodinámico y las temperaturas adecuadas para los enlaces químicos. Otros requisitos menores incluyen un sistema disolvente; la disponibilidad de algunos elementos, tales como el carbono, el hidrógeno, el oxígeno y el nitrógeno; la disponibilidad para las vías metabólicas de ciertos aspectos termodinámicos; y la posibilidad del aislamiento. Si limitamos la vida al agua, es posible proponer criterios más específicos, incluida la presencia de metabolitos solubles y de sustancias genéticas con cargas repetidas, así como una gama bien definida de temperaturas.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahn, J. M., N. A. Boyle, M. T. Macdonald y K. D. Janda, "Peptidomimetics and Peptide Backbone Modifications", *Mini Reviews in Medicinal Chemistry*, 2: 463-473, 2002.
- Arrhenius, G., "Crystals and Life", *Helvetica Chimica Acta*, 86: 1569-1586, 2003.
- Arrhenius, S., *The Destinies of the Stars*, Putnam, Nueva York, 1918.
- Augustyns, K., A. Vanaerschot y P. Herdewijn, "Synthesis of 1-(2, 4-Dideoxy-Beta-D-Erythro-Hexopyranosyl)thymine and its Incorporation into Oligonucleotides", *Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters*, 2: 945-948, 1992.

¹⁰¹ S. A. Benner, "How Small Can a Microorganism Be?", en *Size Limits of Very Small Microorganism*, National Academy Press, Washington, 1999, pp. 126-135.

- Bain, J. D., E. S. Diala, C. G. Glabe, T. A. Dix y A. R. Chamberlin, "Biosynthetic Site-Specific Incorporation of a Non-Natural Amino Acid into a Polypeptide", *Journal of American Chemical Society*, 111: 8013-8014, 1989.
- Bains, W., "Many Chemestries Could be Used to Build Living Systems", *Astrobiology*, 4: 137-167, 2004.
- Baldini, G., B. Martoglio, A. Schachenmann, C. Zugliani y J. Bruner, "Mischarging *Escherichia coli* trn^aPhe with L-4'-[3-(Trifluoromeethyl)-3H-Diazarin-3-yl]phenylalanine, a Photoactivatable Analog of Phenylalanine", *Biochemistry*, 27: 7951-7959, 1988.
- Ban, N., P. Nissen, J. Hansen, P. B. Moore y T. A. Steitz, "The Complete Atomic Structure of the Large Ribosomal Subunit at 2.4 Angstrom Resolution", *Science*, 289: 905-920, 1986.
- Bartel, D. P., y J. W. Szostak, "Isolation of New Ribozymes from a Large Pool of Random Sequences", *Science*, 261: 1411-1418, 1993.
- Benner, S. A., "How Small Can a Microorganism Be?", en *Size Limits of Very Small Organisms: Proceedings of a Workshop*, National Academy Press, Washington, 1999.
- , "Understanding Nucleic Acids Using Synthetic Chemistry", *Accounts of Chemical Research*, 37: 794-797, 2004.
- Benner, S. A., y A. D. Ellington, "Interpreting the Behavior of Enzymes: Purpose or Pedigree?", *CRC Critical Reviews in Bioengineering*, 23: 369-426, 1998.
- Benner, S. A., A. D. Ellington y A. Tauer, "Modern Metabolism as a Palimpsest of the RNA World", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 86: 7054-7058, 1989.
- Benner, S. A., y D. Hutter, "Phosphates, DNA, and the Search for Nonterran Life. A Second Generation Model for Genetic Molecules", *Bioorganic Chemistry*, 30: 62-80, 2002.
- Breslow, R., "On the Mechanism of the Formosa Reaction", *Tetrahedron*, 21: 22-26, 1959.
- Brunner, E., "Fluid Mixtures at High Pressures VI: Phase Separation and Critical Phenomena in 18 (n-Alkyl + Ammonia) and 4 (n-Alkane + Methanol) Mixtures", *Journal of Chemical Thermodynamics*, 20: 1397-1409, 1988.
- Butlerow, A., "Bildung einer zuckerartigen Substanz durch Synthese", *Annalen*, 120: 295-298, 1864.
- Cairns-Smith, A. G., "The Origin of Life and the Nature of the Primitive Gene", *Journal of Theoretical Biology*, 10: 53-88, 1996.
- Cairns-Smith, A. G., y H. Hartman, *Clay Minerals and the Origin of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1986.
- Chen, I. A., y J. W. Szostak, "Membrane Growth Can Generate a Transmembrane pH Gradient in Fatty Acid Vesicles", *Proceedings of Natural Academy of Sciences*, 101: 7965-7970, 2003.
- Chin, J. W., T. A. Cropp, J. C. Anderson, M. Mukherji, Z. W. Shang y P. G. Shultz, "An Expanded Eukaryotic Genetic Code", *Science*, 301: 964-967, 2003.

- Cleland, C. E., y C. F. Chyba, "Defining 'Life'", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 32: 387-393, 2002.
- Cockel, C. S., "Life on Venus", *Planetary Space Science*, 47: 1487-1501, 1999.
- Colin, J., y J. F. Kasting, "Venus: A Search for Clues to Early Biological Possibilities", en G. Carle, D. Schwartz y J. Huntington (comps.), *Exobiology in Solar System Exploration*, NASA/Ames Research Center, Moffet Field, 1992 (NASA Special Publication 512), pp. 45-65.
- Corliss, J. B., J. Dymond, L. Gordon, I. Louis, J. Edmond, J. M. von Herzen, P. Richard, R. Ballard, K. Gren, D. Williams, A. Brainbridge, K. Crane, A. Van y H. Tjeerd, "Submarine Thermal Springs on the Galapagos Rift", *Science*, 203 (4385): 1073-1083, 1979.
- Cronin, J. R., y S. Pizzarello, "Amino-Acids of the Murchison Meteorite II: Seven Carbon Acidic Primary Alpha-Amino Alkanoic Acids", *Geochimica et Cosmoquimica Acta*, 50: 2419-2427, 1986.
- Dawkins, R., *The Selfish Gene*, Oxford University Press, Oxford, 1989. [Versión en español: *El gen egoísta. Las bases biológicas de nuestra conducta*, trad. de J. Robles Suárez, Salvat, Barcelona, 1993.]
- Deamer, D. W., J. P. Dworkin, S. A. Stanford, M. P. Berstein y L. J. Allamandola, "The First Cell Membranes", *Astrobiology*, 2: 371-381, 2002.
- Deamer, D. W., y G. R. Fleischaker, *Origins of Life: The Central Concepts*, Jones & Bartlett, Boston, 1994.
- Edwards, K. J., P. L. Bond, T. M. Gihring y J. F. Banfield, "An Archaeal Iron-Oxidizing Extreme Acidophile Important in Acid Mine Drainage", *Science*, 287: 1796-1799, 2000.
- Elbeik, T., J. Surtihadi, M. Destree, J. Gorlin, M. Holodiy, S. A. Jortani, K. Kuramoto, Ng. Valerie, R. Valdes, A. Valsamakis y N. Terrault, "Multicenter Evaluation of the Performance Characteristics of the Bayer VERSANT HCV RNA 3.0 Assay (bDNA)", *Journal of Clinical Microbiology*, 42: 563-569, 2004.
- Eschenmoser, A., "Chemical Etiology of Nucleic Acid Structure", *Science*, 284: 2118-2124, 1999.
- Eschgaeller, B., J. G. Schmidt y S. A. Benner, "Synthesis and Properties of Oligodeoxynucleotide Analogs with Bis(methylene) Sulfone-Bridges", *Helvetica Chimica Acta*, 86: 2937-2957, 2003.
- Flory, P. J., *Principles of Polymer Chemistry*, Cornell University Press, Ithaca, 1953.
- Freier, W. M., y K. H. Altman, "The Ups and Downs of Nucleic Acid Duplex Stability: Structure-Stability Studies on Chemically-Modified DNA: ARN Duplexes", *Nucleic Acids Research*, 25 (22): 4429-4443, 1997.
- Frick, L., J. P. MacNeela y R. Wolfenden, "Transition State Stabilization by Deaminases:

- Rates of Nonenzymatic Hydrolysis of Adenosine and Cytidine”, *Bioorganic Chemistry*, 15: 100-108, 1987.
- Geyer, C. R., T. R. Battersby y S. A. Benner, “Nucleobase Pairing in Expanded Watson-Crick-like Genetic Information Systems: The Nucleobases”, *Structure*, 11: 1145-1498, 2003.
- Gilbert, W., “Origin of Life: The RNA World”, *Nature*, 319: 618, 1986.
- Gold, T., “The Deep, Hot Biosphere”, *Proceedings of the National Academy of Science*, 89: 6045-6049, 1992.
- Goldanski, V. I., “Nontraditional Mechanisms of Solid-Phase Astrochemical Reactions”, *Kinetics and Catalysis*, 37: 608-614, 1996.
- Guerrier-Takada, C., K. Bardier, T. Marsh, N. Pace y S. Altaian, “The RNA Moiety of Ribonuclease P is the Catalytic Subunit of the Enzyme”, *Cell*, 35: 849-857, 1983.
- Haldane, J. B. S., “The Origins of Life”, *New Biology*, 16: 173-175, 1954.
- Hanczyc, M. M., S. M. Fujikawa y J. W. Szostak, “Experimental Models of Primitive Cellular Compartments: Encapsulation, Growth, Division”, *Science*, 302: 618-622, 2003.
- Hayase, S., “Polysilanes with Functional Groups”, *Endeavor*, 19: 125-131, 1995.
- Hayase, S., R. Horiguchi, Y. Onishi y T. Ushirogouchi, “Syntheses of Polysilanes with Functional Groups 2: Polysilanes with Carboxylic Acids”, *Macromolecules*, 22: 2933-2938, 1989.
- Heinlein, E., *Have Space Suit, Will Travel*, Del Ray Books, Del Ray, 1983.
- Hetch, S. M., B. L. Alford, Y. Kuroda y S. Kitano, “Chemical Aminoacylation of Transfer-RNAs”, *Journal of Biological Chemistry*, 253: 4517-4520, 1978.
- Hoar, W. S., y D. J. Randall, “Fish Physiology”, en J. E. Webb, J. A. Wallwork y J. H. Elgood (comps.), *Guide to Living Fishes*, Macmillan, Londres, 1969-1971.
- Hohsaka, T., y S. M. Masahiko, “Incorporation of Non-Natural Amino Acids into Proteins”, *Current Opinion in Chemical Biology*, 6: 809-815, 2002.
- Hollis, J. M., S. N. Vogel, L. E. Snyder, P. R. Jewell y R. J. Lovas, “The Spatial Scale of Glycolaldehyde in the Galactic Center”, *Astrophysics Journal*, 554: L81-L85, 2001.
- Huag, B., y J. J. Walsh, “Solid-Phase Polymerization Mechanism of Poly(ethyleneterephthalate) Affected by Gas Flow Velocity and Particle Size”, *Polymer*, 39: 6991-6999, 1998.
- Huang, Z., K. C. Schneider y S. A. Benner, “Building Blocks for Oligonucleotide Analogs with Dimethylene-Sulfide, -Sulfoxide and -Sulfone Groups Replacing Phosphodiester Linkages”, *Journal of Organic Chemistry*, 56: 3869-3882, 1991.
- , “Oligonucleotide Analogs with Dimethylene-Sulfide, -Sulfoxide and -Sulfone Groups Replacing Phosphodiester Linkages”, *Methods in Molecular Biology*, 20: 315-353, 1993.

- Jayaraman, K., K. B. McParland, P. Miller y P. O. P. Tso, "Non Ionic Oligonucleoside Methylphosphonates 4: Selective-Inhibition of *Escherichia coli* Protein-Synthesis and Growth by Non-Ionic Oligonucleotides Complementary to the 3' end of 16S Ribosomal-RNA", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 78: 1537-1541, 1981.
- Junge, K., H. Eicken y J. W. Deming, "Bacterial Activity at -2 to -20 Degrees C in Arctic Wintertime Sea Ice", *Applied Environmental Microbiology*, 70: 550-557, 2004.
- , "Motility of *Colwellia psychrerythraea* Strain 34H at Subzero Temperatures", *Applied Environmental Microbiology*, 69: 4282-4284, 2003.
- Kawakawi, T., "Tourmaline Breakdown in the Migmatite Zone of the Ryoke Metamorphic Belt, SW Japan", *Journal of Metamorphic Geology*, 19: 61-75, 2001.
- Kelley, D. S., J. A. Karson, D. K. Blackman, G. L. Früh-Green, D. A. Butterfield, M. D. Lilley, E. J. Olson, M. O. Schrenk, K. K. Roes, G. T. Lebon y P. Rivizzigno, "AT3-60 Shipboard Party: An Off-Axis Hydrothermal Vent Field near the Mid-Atlantic Ridge at 30° N", *Nature*, 412: 145-149, 2001.
- King, A. D. Jr., y W. W. Robertson, "Solubility of Naphthalene in Compressed Gases", *Journal of Chemical Physics*, 37: 1453-1455, 1962.
- Kofoed, J., M. Machuquero, J. L. Reymond y T. Darbre, "Zinc-proline Catalyzed Pathway for the Formation of Sugars", *Chemical Communications*, 13: 1540-1541, 2004.
- Kolodner, M. A., y P. G. Steffles, "The Microwave Absorption and Abundance of Sulfuric Acid Vapor in the Venus Atmosphere Based on New Laboratory Measurements", *Icarus*, 132: 151-169, 1998.
- Kondepudi, D. K., R. J. Kauffman y N. Singh, "Chiral Symmetry-Breaking in Sodium-Chlorate Crystallization", *Science*, 250: 975-976, 1990.
- Koshland, D. E., "The Seven Pillars of Life", *Science*, 295: 2215-2216, 2002.
- Kreuzweiser, J., J. P. Schinnitzler y R. Streinbrecher, "Biosynthesis of Organic Compounds Emitted by Plants", *Plant Biology*, 1: 149-159, 1999.
- Krishnamurty, R., G. Arrhenius y A. Eschenmoser, "Formation of Glycolaldehyde Phosphate from Glycolaldehyde in Aqueous Solution", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 29: 333-354, 1999.
- Kruger, K., P. J. Grabowski, A. J. Zang, J. Sands, D. E. Gottschling y T. R. Cech, "Self-splicing RNA: Autoexcision and Autocyclization of the Ribosomal RNA Intervening Sequence of Tetrahymena", *Cell*, 31: 147-157, 1982.
- Laralde, R., M. P. Robertson y S. L. Miller, "Rates of Decomposition of Ribose and Other Sugars: Implications for Chemical Evolution", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 92: 8158-8160, 1995.
- Laybourn-Parry, J., "Survival Mechanisms in Antarctic Lakes", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 357: 863-869, 2002.

- Lee, D. H., J. R. Granja, J. A. Martínez, K. Severin y M. R. Ghadiri, "A Self-replicating Peptide", *Nature*, 382: 525-528, 1996.
- Linkletter, B. A., I. E. Szabo y T. C. Bruice, "Solid-Phase Synthesis of Oligopurine Deoxynucleic Guanidine (DNG) and Analysis of Binding with DNA Oligomers", *Nucleic Acids Research*, 29: 2370-2376, 2001.
- Lovis, J. M, F. J. Lovas y P. R. Jewell, "Interstellar Glycolaldehyde: The First Sugar", *Astrophysics Journal*, 540: L107- L110, 2000.
- Lu, B. C. Y., D. Zang y W. Sheng, "Solubility Enhancement in Supercritical Solvents", *Pure Applied Chemistry*, 62: 2277-2285, 1990.
- Luisi, P. L., P. Walde y T. Oberholzer, "Lipid Vesicles as Possible Intermediates in the Origin of Life", *Current Opinion on Colloid and Interface Science*, 4: 33-39, 1999.
- Maxha, J., L. M. Huang y R. West, "Synthesis and NMR Spectroscopy of Permethylpolysilane Oligómeros $\text{Me}(\text{SiMe}_2)_{10}\text{Me}$, $\text{Me}(\text{SiMe}_2)_{16}\text{Me}$, and $\text{Me}(\text{SiMe}_2)_{22}\text{Me}$ ", *Organometallics*, 10: 656-659, 1991.
- Miller, P. S., K. B. McParland, K. Jayaraman, P. D. Q. Tso, "Biochemical and Biological Effects of Nonionic Nucleic Acid Methylphosphonates", *Biochemistry*, 20: 1874-1880, 1981.
- Miller, S. L., y L. E. Orgel, *The Origins of Life on the Earth*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, 1974.
- Moody, J. B., "Sepentinization", *Lithos*, 9: 125-138, 1976.
- Navarro-González, R., A. M. Small, R. C. Quinn, F. J. Grunthaner, L. Cáceres, B. Gomez-Silva y C. P. McKay, "Mars-like Soils in the Atacama Desert, Chile, and the Dry Limit of Microbial Life", *Science*, 392 (5647): 1018-1021, 2003.
- Noren, C. J., S. J. Anthony-Cahill, M. C. Griffith y P. G. Schultz, "A General Method for Site-Specific Incorporation of Unnatural Amino Acids into Proteins", *Science*, 244: 182-188, 1989.
- Ogren, W. L., y G. Bowes, "Oxygen Inhibition and Other Properties of Soybean Ribulose 1,5-Diphosphate Carboxylase", *Journal of Biological Chemistry*, 247: 2171-2176, 1972.
- Olah, G. A., G. Salem, J. S. Staral y T. L. Ho, "Preparative Carbocation Chemistry 13: Preparation of Carbocations from Hydrocarbons via Hydrogen Abstraction with Nitrosonium Hexafluorophosphate and Sodium Nitrite Trifluoromethanesulfonic Acid", *Journal of Organic Chemistry*, 43: 173-175, 1978.
- Oró, J., "Synthesis of Adenine from Ammonium Cyanide", *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 2: 407-412, 1960.
- Pace, N., "The Universal Nature of Biochemistry", *Proceedings of National Academy of Sciences*, 98: 805-808, 2001.

- Pedersen, K., "The Deep Subterranean Biosphere", *Earth-Science Review*, 34: 243-260, 1992.
- Pizzarelo, S., y A. L. Weber, "Prebiotic Amino Acids as Asymmetric Catalysts", *Science*, 303 (5661): 1151, 2004.
- Reddy, P. M., y T. C. Bruice, "Solid-phase Synthesis of Positively Charged Deoxynucleic Guanidine (DNG) Oligonucleotide Mixed Sequences", *Biorganic and Medicinal Chemistry Letters*, 13: 1281-1285, 2003.
- Ricardo, A., M. A. Carrigan, A. N. Olcott, S. A. Benner, "Borate Minerals Stabilize Ribose", *Science*, 303 (5655): 196, 2004.
- Richert, C., A. L. Roughton y S. A. Benner, "Nonionic Analogs of RNA with Dimethylene Sulfone Bridges", *Journal of the American Chemical Society*, 118: 4518-4531, 1996.
- Robertson, W. W., y R. E. Reynolds, "Effects of Hydrostatic Pressure on the Intensity of the Singlet-Triplet Transition of 1-Chloronaphthalene in Ethyl Iodide", *Journal of Chemical Physics*, 29: 138-141, 1958.
- Rouse, G. W., S. K. Goffredi y R. C. Vrijenhoek, "Osedax: Bone Eating Marine Worms with Dwarf Males", *Science*, 305: 668-671, 2004.
- Roughton, A. L., S. Potmann, S. A. Benner y M. Egli, "Crystal Structure of a Dimethylene-Sulfone-Linked Ribonucleotide Analog", *Journal of the American Chemical Society*, 117: 7249-7250, 1995.
- Ruiz-Mirazo, K., J. Peretó y A. Moreno, "A Universal Definition of Life: Autonomy and Open-Ended Evolution", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 34: 323-346, 2004.
- Ryan, J. G., W. P. Leeman, J. D. Morris y C. H. Langmuir, "The Boron Systematics of Intraplate Lavas: Implications for Crust and Mantle Evolution", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 60: 415-422, 1996.
- Sagan, C., s.v. "Life", *The Encyclopædia Britannica*, William Benton, Londres, 1970.
- Sagan, C., y H. Morowitz, "Life in the Clouds of Venus", *Nature*, 215: 1259-1260, 1967.
- Sagan, C., W. R. Thompson y B. N. Khare, "Titan: A Laboratory for Prebiological Organic Chemistry", *Accounts of Chemical Research*, 25: 286-292, 1992.
- Sagan, C., y E. E. Salpeter, "Particles, Environments, and Possible Ecologies in the Jovian Atmosphere", *Astrophysics Journal*, 32: 737-755, 1976.
- Sanji, T., F. Kitayama y H. Sakurai, "Self-Assembled Micelles of Amphiphilic Polysilane Block Copolymers", *Macromolecules*, 32: 5718-5720, 1999.
- Schmidt, J. G., B. Eschgfäller y S. A. Benner, "A Direct Synthesis of Nucleoside Analogs Homologates at the 3' and 5' Positions", *Helvetica Chimica Acta*, 86: 2957-2997, 2003.
- Schneider, K. C., y S. A. Benner, "Oligonucleotides Containig Flexible Nucleoside Analogs", *Journal of the American Chemical Society*, 112: 453-455, 1990.

- Schoffstall, A. M., "Prebiotic Phosphorylation of Nucleosides in Formamide", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 7: 399-412, 1976.
- Schoffstall, A. M., R. J. Barto y D. L. Ramos, "Nucleoside and Deoxynucleoside Phosphorylation in Formamide Solutions", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 12 (2): 143-151, 1982.
- Schoffstall, A. M., y E. M. Liang, "Phosphorylation Mechanisms in Chemical Evolution", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 15: 141-150, 1985.
- Schulze-Makuch, D., D. H. Grinspoon, O. Abbas, L. N. Irwin y M. A. Bullock, "A Sulfur-Based Survival Strategy for Putative Phototropic Life in the Venusian Atmosphere", *Astrobiology*, 4: 11-18, 2004.
- Schulze-Makuch, D., L. N. Irwin y T. Irwin, "Astrobiological Relevance and Feasibility of a Sample Collection to the Atmosphere of Venus", en H. Lacoste (comp.), *Proceedings of the First European Workshop on Exo-astrobiology*, ESA Publication Division, Noordwijk, 2002, pp. 247-250.
- Schulze-Makuch, D., y L. N. Irwin, *Life in the Universe: Expectations and Constraints*, Springer, Berlín, 2004.
- Schwartz, S. P., "Introduction", en S. P. Schwartz (comp.), *Naming, Necessity, and Natural Kinds*, Cornell University Press, Ithaca, 1977.
- Seckbach, J., y W. F. Libby, "Vegetative Life on Venus? Or Investigations with Alga Which Grow under Pure CO₂ in Hot Acid Media at Elevated Pressures", *Space Life Science*, 2: 121-143, 1970.
- Shapiro, R., "Prebiotic Ribose Synthesis: A Critical Analysis", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 18: 71-85, 1988.
- Shöning, K. U., P. Scholz, S. Guntha, X. Wu, R. Krishnamurthy y A. Eschenmoser, "Chemical Etiology of Nucleic Acid Structure: A-Threofuranosyl-(3'-2') Oligonucleotide System", *Science*, 290: 1347-1351, 2000.
- Sismour, A. M., S. Lutz, J. H. Park, M. J. Lutz, P. L. Boyer, S. H. Hughes y S. A. Benner, "PCR Amplification of DNA Containing Non-Standard Base Pairs by Variants of Reverse Transcriptase from Human Immunodeficiency Virus-1", *Nucleic Acids Research*, 32 (2): 728-735, 2000.
- Springsteen, G., y G. F. Joyce, "Selective Derivatization and Sequestration of Ribose from a Prebiotic Mix", *American Chemical Society*, 126: 9578-9583, 2004.
- Steinbeck, C., y C. Richert, "The Role of Ionic Backbones in RNA Structure: An Unusually Stable Non-Watson-Crick Duplex of a Nonionic Analog in an Apolar Medium", *Journal of the American Chemical Society*, 120: 11576-11580, 1998.
- Stevens, T. O., "Subsurface Microbiology and the Evolution of the Biosphere", en P. S. Amy y D. L. Halderman (comps.), *Microbiology of the Terrestrial Deep Subsurface*:

- Microbiology of Extreme and Unusual Environments*, Chemical Rubber Company Press, Boca Raton, 1997, pp. 205-224.
- Stevenson, D., "Life-Sustaining Planets in Interstellar Space?", *Nature*, 400: 32, 1999.
- Szoztak, J. W., D. P. Bartel y P. L. Luisi, "Synthesizing Life", *Nature*, 409: 387-390, 2001.
- Tawfik, D. S., y A. D. Griffiths, "Man-Made Cell-like Compartments for Molecular Evolution", *Nature Biotechnology*, 16: 652-656, 1998.
- Visser, C. M., y R. M. Kellog, "Biotin: Its Place in Evolution", *Journal of Molecular Evolution*, 11: 171-178, 1978.
- Wächtershäuser, G., "Evolution of the First Metabolic Cycles", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87: 200-204, 2003.
- Walsh, R., "Bond Dissociation Energy Values in Silico-Containing Compounds and Some of their Implications", *Accounts of Chemical Research*, 14: 246-252, 1981.
- Watson, J. D., N. H. Hopkins, J. W. Roberts, J. A. Steitz y A. M. Weiner, *Molecular Biology of the Gene*, 4ª ed., Benjamin Cummins, Menlo Park, 1987.
- West, R. A., "Atmosphere of the Giant Planets", en L. A. McFadden, P. R. Weissman y T. V. Johnson (comps.), *Encyclopædia of the Solar System*, vol. 2, Academic Press, San Diego, 1999, pp. 383-402.
- Westheimer, F. H., "Why Nature Chose Phosphates", *Science*, 235: 1173-1178, 1978.
- Weyerstah, P., "Synthesis of Compounds Isolated from Essential Oils", en V. Lanzotii y O. Tagliatela-Scafati (comps.), *Flavour and Fragrance Chemistry: Proceedings of the Phytochemical Society of Europe*, vol. 46, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 2000, pp. 57-66.
- Yamauchi, K., Y. Mitsuda y M. Kinoshita, "Peptides Containing Aminophosphonic Acids III. The Synthesis of Tripeptide Analogs Containing Aminomethylphosphonic Acid", *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, 48: 3285-3286, 1975.

Kenneth H. Nealson

XIII. LA BÚSQUEDA DE LA VIDA EN EL UNIVERSO: ENSEÑANZAS DE LA TIERRA*

EN EL curso del próximo decenio, la NASA, conjuntamente con colegas de diversos países, se embarcará en una de las más emocionantes misiones que se hayan emprendido hasta la fecha para explorar el espacio: la recolección de muestras en el suelo de Marte. La misión, varias veces aplazada, seguramente tendrá una arquitectura muy similar a la que originalmente se planeó para la misión de Marte 03/05 (véase la figura XIII.1). A saber, consistirá en dos lanzamientos diferentes, cada uno de los cuales realizará experimentos en la superficie de Marte: recogerá y almacenará muestras y pondrá en órbita marciana dentro de dos cápsulas diferentes las muestras reunidas. Subsecuentemente, un módulo orbital (vehículo de retorno de muestras) se utilizará para recoger las cápsulas orbitales con las muestras y retornar con ellas a la Tierra a fin de que se analicen. Es probable que para 2011 ya tengamos en la Tierra entre uno y dos kilogramos de muestras del suelo marciano para estudiarlas científicamente. Estas muestras aumentarán inmensamente nuestros conocimientos sobre el Sistema Solar y la misma Tierra, y también serán escudriñadas cuidadosamente para detectar la presencia de indicadores de la vida actual o pasada en el planeta rojo. Dada la ausencia de cualquier tipo de características obvias en Marte que sugieran la existencia de la vida, y dados los resultados negativos (en relación con la vida) que se obtuvieron en la misión Viking de los años setenta, un observador escéptico bien podría preguntar “¿por qué enviar esta misión?”

Esencialmente, los resultados de las recientes investigaciones científicas en diversas áreas proporcionan las bases para un optimismo creciente respecto a la detección de la vida en otros lugares del universo, y, si hemos de lanzar tal búsqueda, un razonable primer paso sería iniciarla en nuestro cercano vecino, Marte. En relación con los nuevos conocimientos: 1) hemos aprendido cosas acerca del universo que hacen que sea mucho más razonable la búsqueda de la vida

* Este capítulo apareció originalmente en *Annals of the New York Academy of Sciences*, 950 (1): 241-258, 2001. © John Wiley & Sons Ltd., 2001.

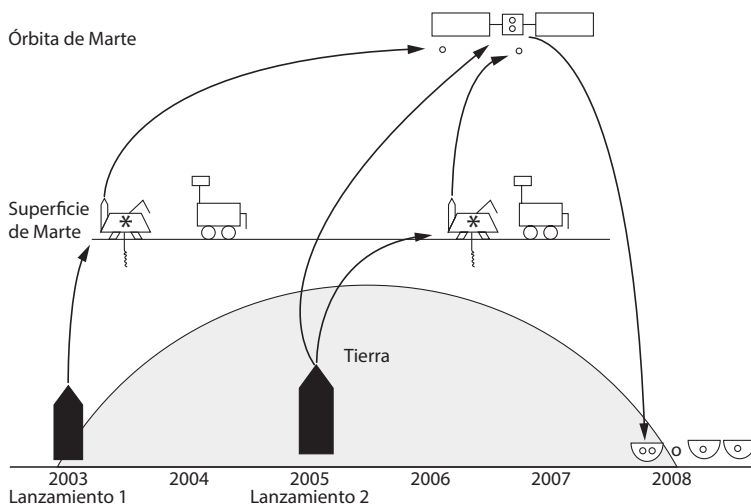


FIGURA XIII.1. *Arquitectura de un Mars Sample Return (MSR) Mission*
[Misión de Retorno de Muestras de Marte].

La arquitectura original del MSR, tal como se planeó en 2000, muestra el plan general y la escala de tiempo para una expedición conjunta de los Estados Unidos y Francia. En el proyecto original, la misión consistía en dos lanzamientos: uno en 2003 con el aterrizaje de un módulo de desembarco con un tractor, y el segundo en 2005 con el aterrizaje de otro módulo y otro tractor, y un módulo (Earth Return Vehicle, o ERV) [Vehículo de Retorno a la Tierra] que permanecería en órbita marciana. Tras aterrizar en el suelo marciano, el tractor reunirá las muestras (excavadas en algunas rocas y en el suelo) y las llevará a un pequeño recipiente en el módulo de desembarco. Estas muestras serán colocadas en una pequeña esfera (cilindro orbital u os) y lanzadas en órbita marciana, de manera que al final de esta fase habrá dos pequeños “satélites” girando en torno a Marte. Éstos serán recuperados por el ERV y llevados a la Tierra para ser analizados. Las fechas de esta misión han sido aplazadas y se proyecta una fecha de lanzamiento para finales del decenio. (Figura extraída de N. R. Haynes, “The NASA Mars Exploration Program”).

extraterrestre, y 2) nuestra comprensión de la vida en la Tierra ha cambiado de manera dramática, modificando nuestras ideas sobre la biota de nuestro propio planeta y, por lo tanto, sobre la posibilidad de que la vida pueda existir en lugares que anteriormente se consideraban demasiado hostiles para la vida. Aunque los descubrimientos astronómicos (nuevos soles, nuevos planetas, nueva información sobre la estructura y la historia de Marte, el supuesto océano en la luna Europa, etc.) son importantes, aquí yo habré de enfocar las “enseñanzas de la Tierra”.

Como director que soy del Center for Life Detection at the Jet Propulsion Laboratory [Centro para la Detección de la Vida en el Laboratorio de Propulsión a Reacción] me encantó que se me invitara a participar en este simposio sobre la ciencia y la religión.¹ La conexión con el supuesto conflicto entre las dos áreas no es obvia para mí, un microbiólogo interesado en la primigenia evolución de la Tierra y su biota. Desde mi perspectiva, ambas empresas sólo fueron posibles después de que la humanidad se hubiera desarrollado hasta un nivel donde tuviéramos el honor y el placer de practicar la ciencia y de reflexionar sobre nuestro destino, nuestra ética y nuestra moralidad. Así, durante la mayor parte de la historia de la Tierra en nuestro planeta predominó una vida que no tenía nada que ver con la ciencia ni con la religión —¡en absoluto le interesaban este tipo de cosas!—. Por lo tanto, yo creo que será adecuado que empiece con una presentación de nuestra idea actual de la historia de la vida en nuestro propio planeta, teniendo presente que toda búsqueda de la vida en otros lugares deberá realizarse en el marco de nuestros conocimientos sobre la historia de la vida en la Tierra.

Durante sus primitivas etapas de compatibilidad con la vida, la Tierra fue un lugar bastante hostil para la vida como hoy la conocemos. Era un lugar caliente cuya atmósfera carecía de oxígeno y tenía poco ozono para proteger al planeta de la dañina luz ultravioleta. Sin embargo, fue en ese medio ambiente donde la vida apareció y dejó sus primeros rastros. Las recientes investigaciones de la formación Isua en Groenlandia han detectado vestigios de actividad metabólica (metabolismo de carbono) que indican que la vida ya existía en la Tierra hace 3.8 Ga (miles de millones de años). Esto indica que la invención de la vida tuvo lugar con relativa rapidez, *grosso modo* en el curso de los 200 millones de años tras el enfriamiento del planeta, el cual de este modo se volvió hospitalario para la vida basada en el carbono.

Estos descubrimientos han propiciado las especulaciones sobre la vida en general (por ejemplo, los problemas asociados con la invención de los sistemas vivos complejos), así como sobre la posibilidad de que sistemas vivos similares pudieran haber evolucionado en otros planetas. Por ejemplo, generalmente se acepta que en el primer periodo del desarrollo planetario, y hasta aproximadamente 3.5 Ga, la Tierra y Marte pudieron haber compartido condiciones planetarias similares. Esto ha llevado a muchos a plantear que la vida pudo haber tenido el tiempo suficiente, y las condiciones apropiadas, para desarrollarse en el Marte primitivo, tanto como aquí. Subsecuentemente, sin embargo, Marte perdió su

¹ Aquí el autor se refiere al simposio que motivó la publicación original de este capítulo. [Comps.]

magnetósfera, su hidrósfera, y la mayor parte de su atmósfera, lo cual convirtió la superficie de Marte, en comparación con la de la Tierra, en un medio ambiente extremadamente hostil. Aunque las actuales condiciones de luz ultravioleta elevada, ausencia de agua líquida y temperaturas debajo del punto de congelamiento indican que hay que descartar la existencia de la vida en la superficie de Marte, la posibilidad de que haya existido alguna vez no se puede excluir con base en nuestro conocimiento de la historia del planeta.

La mayor parte de la evidencia de la vida más primitiva de la Tierra se encuentra en la forma de rastros químicos: existen pocos fósiles verdaderamente primitivos. Tal ausencia de un registro fósil implica que la vida unicelular predominó en la Tierra primitiva, un hecho que concuerda con lo que sabemos sobre la vida unicelular en el planeta hoy y sobre las condiciones necesarias para la preservación de los fósiles. De hecho, hasta hace 2 Ga (2 000 millones de años), en el planeta había poco oxígeno, y el desarrollo de células eucariotas complejas probablemente no era posible.

Con base en la investigación de los suelos primitivos, se cree que el oxígeno apareció por vez primera y rápidamente se propagó en la atmósfera hace aproximadamente 2 Ga (figura XIII.2) y que sólo entonces fue posible el desarrollo de las células eucariotas. La explosión cambriana de las especies y de los eucariotas multicelulares complejos no tuvo lugar sino hasta hace 500 millones de años aproximadamente, cuando el oxígeno alcanzó los actuales niveles. A partir de ese momento la Tierra empezó a asumir lo que para nosotros sería una apariencia familiar: en ella emergieron las plantas, los animales y los hongos.

Sin embargo, incluso antes de la aparición del oxígeno, la Tierra rebosaba de vida microbiana; es ésta la perspectiva que hay que tener presente en la búsqueda de la vida en otros planetas cuya edad evolutiva se desconozca. Efectivamente, otros planetas podrían encontrarse en alguna de estas etapas, y la búsqueda de la vida no puede simplemente suponer que hayan alcanzado una etapa dada de la vida o de la evolución planetaria. También se deberá tener presente que los planetas evolucionan y que la vida evoluciona, y que esta interrelación evolutiva afecta a ambos: la evolución de la Tierra (fuertemente influida por la presencia de la vida) ha tenido un gran impacto en la subsecuente evolución de la vida. El oxígeno que respiramos es un producto de la primitiva evolución de la fotosíntesis. Sin esta innovación, el planeta bien podría estar vivo, pero su vida sería muy diferente de la que hoy conocemos.

Pero ¿cómo es realmente la vida en la Tierra hoy —realmente conocemos la vida en nuestro propio planeta—? La respuesta a esta pregunta probablemente es

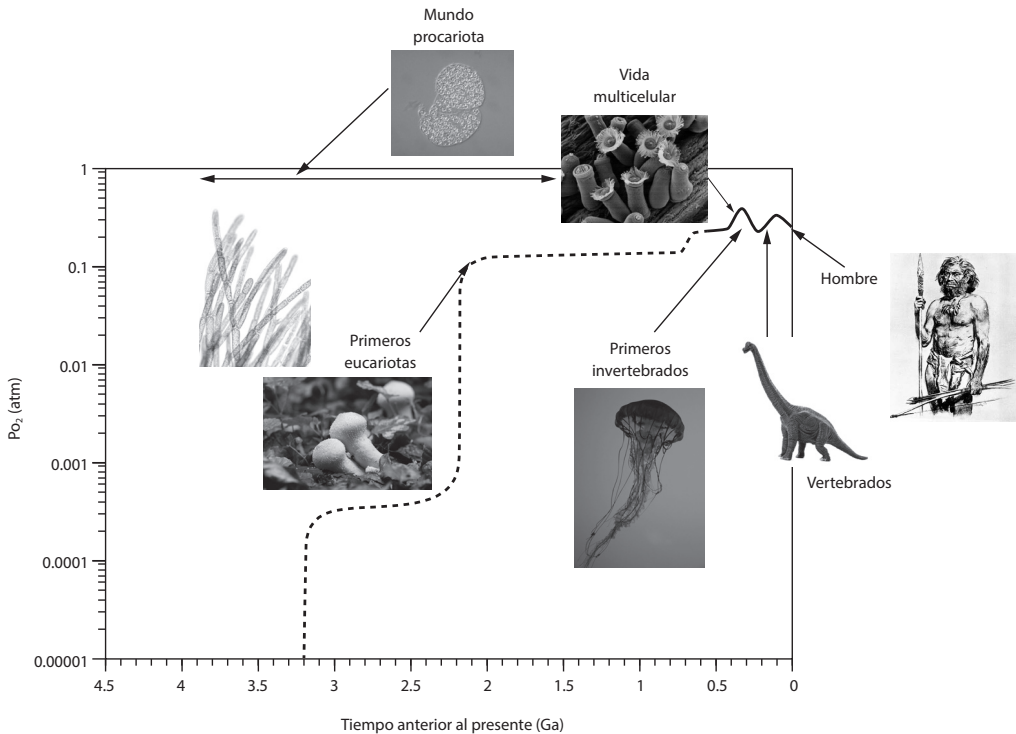


FIGURA XIII.2. La evolución de la vida en la Tierra, en relación con la aparición del oxígeno en la atmósfera.

La gráfica de la relación del oxígeno y el tiempo se proyecta con base en los datos de Rye y Holland,² quienes han propuesto este esquema como el más probable partiendo de la investigación de los suelos primitivos (paleosuelos). Las ilustraciones de los organismos pretenden destacar que la Tierra primigenia se colonizó por organismos simples, probablemente de naturaleza procariota, y que los organismos complejos (grandes y multicelulares) no aparecieron hasta que el nivel del oxígeno no llegó al actual, hace aproximadamente 500 millones de años. Ilustraciones: Burgiel, Alby De Tweede, Jeff Kraus y Aleksandr Ugorenkov.

que “la conocemos muy mal”, especialmente si consideramos el conjunto entero de la vida en la Tierra. Para hacerlo, no sólo debemos pensar en los organismos “superiores”, sino también en los organismos de una sola célula sin un núcleo di-

² R. Rye y H. D. Holland, “Paleosols and the Evolution of the Atmospheric Oxygen: A Critical Review”, *American Journal of Science*, 298: 621-672, 1998.

ferenciado, colectivamente conocidos como procariotas. Estos organismos deben incluirse en cualquier discusión de la naturaleza de la vida en la Tierra, tanto la pasada como la presente. Para ilustrar la manera en que hoy se ve a los procariotas, en comparación a como se los veía hace tan solo unos años, ofrezco aquí una cita de *El naturalista*, obra del doctor E. O. Wilson, el distinguido experto en evolución animal:

Si yo pudiera empezar todo de nuevo y vivir mi visión del siglo XXI, yo sería un ecologista microbiano. Diez millones de bacterias viven en un gramo de tierra normal, apenas un pellizco entre el pulgar y el índice. Éstas representan miles de especies, de las cuales la ciencia no conoce casi ninguna. Yo entraría en ese mundo con la ayuda de un microscopio moderno y del análisis molecular.

El doctor Wilson ha hecho inmensas contribuciones a nuestra comprensión de la vida macroscópica en la Tierra, y en esta cita él manifiesta la opinión de que ha llegado el tiempo de llevar ese interés al nivel microbiano. Para ampliar estas ideas, yo señalaría que si bien la biomasa microbiana constituye 50% o más de la biomasa de la Tierra, sólo hemos podido cultivar y caracterizar un pequeño porcentaje de estos procariotas, y por lo tanto no sabemos casi nada sobre casi la mitad de nuestra biota terráquea. ¡Tal cosa es lastimosa en una sociedad que afirma que está lista para emprender la búsqueda de la vida en el universo!

Además de los nuevos hallazgos respecto a la aparición de la vida terráquea, otros descubrimientos biológicos han modificado nuestra percepción de la vida en la Tierra. Estos nuevos desarrollos, que deberán incluirse en toda búsqueda de la vida extraterrestre, involucran la naturaleza y la diversidad de la vida en la Tierra (por ejemplo, la definición misma de la vida terráquea), así como nuevas ideas sobre la tenacidad y la fortaleza de la vida como la conocemos.

Nuestro concepto de la naturaleza de la vida en la Tierra ha experimentado cambios importantes en los últimos dos decenios. Hemos pasado de una idea de la vida particularmente centrada en los eucariotas, a una que admite abiertamente que los pequeños organismos unicelulares que alguna vez se ignoraron juegan un papel vitalmente importante en el metabolismo de nuestro planeta. La idea de la vida que la mayor parte de nosotros recibimos de nuestros maestros de biología es la que usualmente se denomina la de los cinco reinos (figura XIII.3). Ésta se derivó a mediados del siglo XVIII de los trabajos de Linneo y otros científicos.

La clasificación se basaba en las características visibles de los organismos, a fin de nombrarlos a cada uno (por ejemplo, *Homo sapiens* en el caso del hombre),

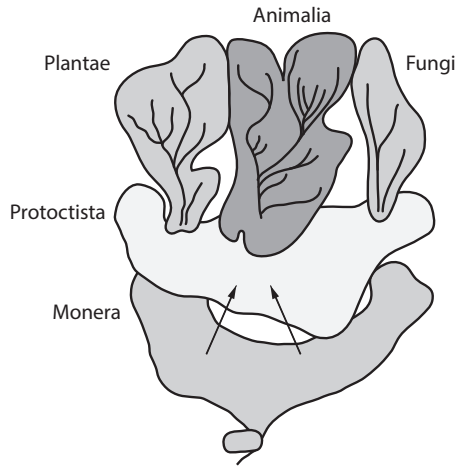


FIGURA XIII.3. Los cinco reinos de la vida.

Esta perspectiva representa la vida terrestre como un compuesto de cinco reinos, cuatro de los cuales son eucariotas, ubicándose el quinto, el monera (que hoy llamamos el dominio de los procariotas), en la base del árbol. Esta idea de la vida se basa en los análisis estructurales y funcionales de los organismos y en una supuesta vía evolutiva donde la vida pasó de lo simple a lo más complejo, y de lo pequeño a lo grande.

y a fin de agrupar a los organismos de apariencia similar. El diagrama en la figura XIII.3 es el llamado árbol filogenético; tales árboles se utilizan para ilustrar la progresión evolutiva que pudo ocurrir y que ha resultado en los organismos existentes (por ejemplo, para responder a la pregunta de cuál organismo fue anterior a cuál otro en el curso del tiempo).

Sobre todo por la naturaleza de las herramientas de que se disponía (el ojo humano, las lupas y, posteriormente, los microscopios sencillos), no es sorprendente que en tales árboles predominaran los macroscópicos eucariotas multicelulares, tales como los hongos, las plantas y los animales. Los minúsculos protistas eucariotas (amebas, paramecios, giardias, etc.) fueron relegados al penúltimo travesaño de la escalera, mientras que los procariotas, convenientemente al último, allí donde se pudiera reconocer su presencia, pero no seriamente. Todo este planteamiento resultaba razonable por entonces, en el sentido de que la diversidad estructural determinaba la clasificación y los unicelulares procariotas anucleados, como se les calificaba, no eran comparables a los organismos estructural y conductualmente más grandes y diversos que se conocen colectivamente como los eucariotas.

Este concepto de la biosfera ha cambiado de manera dramática en el último

decenio con la llegada de la taxonomía molecular y la filogenia. Hoy el planteamiento básico es que hay algunas moléculas que son comunes en toda la vida terráquea (por ejemplo, el ARN ribosómico 16S), y que, si se pudieran secuenciar tales moléculas y comparar las secuencias, podría ser posible usar esta información química para comparar todos los ejemplares de la vida entre sí, incluso aquellos que sólo se pueden ver con el microscopio. Aunque en realidad el germen de esta idea ha existido desde hace decenios, su demostración se hizo sólo recientemente con el nuevo desarrollo de las técnicas de la secuenciación de los ácidos nucleicos y la utilización de esta información para las comparaciones entre los organismos.

El trabajo pionero del doctor Carl Woese de la Universidad de Illinois³ ha cambiado la forma en que vemos la vida en la Tierra. En relación con los procariotas, que carecen de las características que puedan utilizarse para compararlos entre sí o con los eucariotas, esta metodología molecular permitió, por vez primera, entender la filogenia (una parte de la historia natural que antes no existía) de los diversos grupos.⁴ No sólo se podía comparar a los procariotas entre sí, sino que también la comparación podía englobar los cinco reinos, ya que los eucariotas tenían las mismas moléculas. Los resultados de esta metodología fueron extraordinarios: se encontró que los cuatro reinos eucariotas eran bastante parecidos, mientras que el reino de los procariotas era muy diverso, siendo por lo tanto dividido en dos reinos diferentes, el de las bacterias y el de las arqueas (figura XIII.4).

Un rápido vistazo al árbol molecular revela que la variación genética principal entre los eucariotas se encuentra en los protistas unicelulares, mientras que los tres reinos dominantes (plantas, animales y hongos) se agrupan en el extremo del ensamblaje eucariota, desplegando únicamente una diversidad genética mínima (figura XIII.4). Es al parecer posible alcanzar la diversidad estructural y conductual (características que sólo aparecieron en los últimos 500 millones de años), sin perder la homogeneidad genética. Dado que los eucariotas multicelulares evolucionaron recientemente, y que durante casi 3 000 millones de años los procariotas predominaron en la superficie de la Tierra, a uno no le debería sorprender que la mayor parte de la diversidad genética del planeta resida en este grupo.

Otro notable aspecto de la vida en la tierra es el de su resistencia y tenacidad. A fin de tratar esta cuestión, tenemos que retornar brevemente a la discusión so-

³ C. R. Woese, "Bacteria Evolution", *Microbiology Review*, 51: 221-271, 1987; C. R. Woese, "There must Be a Prokaryote Somewhere: Microbiology's Search for Itself", *Microbiology Review*, 58: 1-9, 1994.

⁴ G. J. Olsen, C. R. Woese y R. Overbeek, "The Winds of Evolutionary Change: Breathing New Life into Microbiology", *Journal of Bacteriology*, 176: 1-6, 1994; D. A. Stahl, "The Natural History of Microorganisms", *American Society of Microbiology, Series B*, 59: 609-613, 1993.

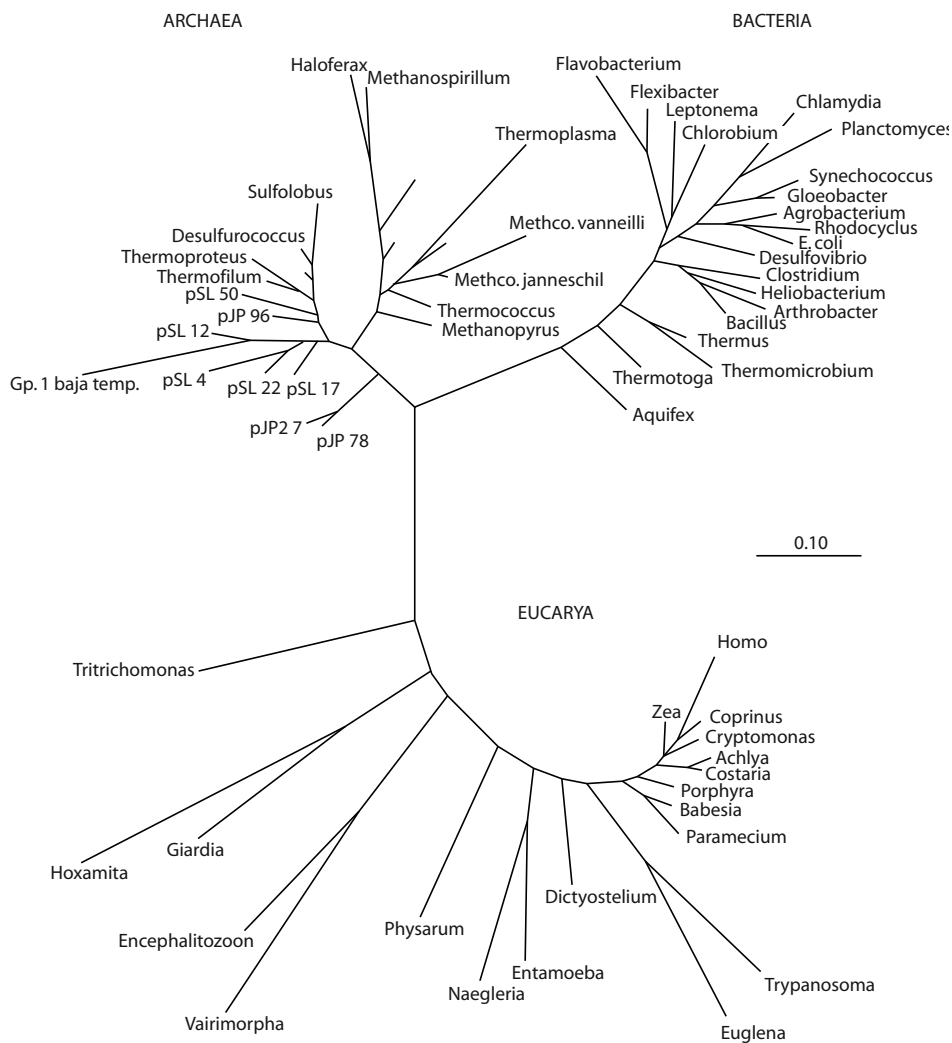


FIGURA XIII.4. Los tres dominios de la vida.

Con base en el análisis secuencial del gen de ARN ribosómico 16S que todos los organismos terráqueos poseen, es posible construir una filogenia molecular que permite comparar entre sí a todos los organismos, inclusive aquellos que no pueden cultivarse en el laboratorio. Esta metodología ha producido un concepto de la vida muy diferente, como el que aquí se muestra, donde los reinos principales de la vida (animales, plantas, hongos y protoctistas) que aparecen en la figura XIII.3 quedan agrupados en un solo dominio, y el reino de los procariotas se amplía y fracciona en dos dominios llamados Archaea y Bacteria.

bre los procariotas y los eucariotas. Algunas de las propiedades clave que diferencian a los procariotas de sus más complejos compañeros eucariotas se muestran en el cuadro XIII.1. Los eucariotas se distinguen por la presencia de un núcleo y de una membrana nuclear (*eu* = verdadero; *karyon* = núcleo), y por lo general se caracterizan por su estructura compleja, rasgos conductuales complejos, y metabolismo sencillo. Su metabolismo funciona primordialmente gracias a la asimilación del carbono orgánico basada en la inhalación del oxígeno, y el sustancial suministro de energía obtenido mediante este proceso se utiliza para sustentar sus complejos procesos estructurales y conductuales. Básicamente, las plantas obtienen carbono orgánico mediante la fotosíntesis y los animales comen las plantas (y otros animales), todo lo cual conduce a la creación de ese tipo de comunidades complejas que son fácilmente reconocibles por su nivel de trófico o su ciclo de predador-presa. La existencia misma de su compleja estructura (tanto los organelos intracelulares como los tejidos y órganos multicelulares) causa en los eucariotas la inadaptación a las extremas condiciones ambientales que sus parientes procarióticos con su estructura sencilla fácilmente toleran (por ejemplo, a más de 50 °C es raro encontrar eucariotas funcionales).

Por otra parte, los procariotas son los “duros” del medio ambiente, capaces de tolerar diversas condiciones extremas de pH, temperatura, salinidad, radiación y sequedad. Yo llamo a estos organismos los cuadrantes del mundo viviente; son resistentes, sencillos, eficaces y casi indestructibles. Algunas de las propiedades fundamentales que los diferencian de los eucariotas se muestran en el cuadro XIII.1. Primero, son pequeños —han logrado optimizar su proporción de volumen/superficie a fin de maximizar sus procesos químicos—. En promedio, en relación con el mismo volumen de biomasa, un procariota puede tener de 10 a 100 veces más área superficial. Por lo tanto, en un humano, cuyo volumen corporal puede incluir un bajo por ciento (por masa) de bacterias (simbiontes intestinales), ¡las bacterias constituyen entre 24 y 76% del área superficial efectiva! En medios como los lagos y los océanos, donde se calcula que la biomasa bacteriana es aproximadamente 50% del total, las bacterias constituyen entre 91 y 99% del área superficial activa, y en medios anóxicos, donde la biomasa es principalmente procariótica, las áreas superficiales activas son prácticamente procarióticas en su totalidad. En resumen, si uno quiere saber algo sobre la química ambiental, ¡debe estudiar a los procariotas!

Los procariotas tienen paredes celulares rígidas que les impiden una vida de predadores. Se limitan a una vida como químicos, realizando su metabolismo mediante el transporte y la vía química. En cambio, los eucariotas son capaces de asimilar (mediante un proceso llamado fagocitosis) otras células, involucrándose

CUADRO XIII.1. *Propiedades de los procariotas y los eucariotas*

<i>Propiedades clave</i>	
<i>Procariotas</i>	<i>Eucariotas</i>
Dimensión pequeña (1-2 μm) (alta proporción S/V) favorece reacciones químicas	Células de mayor tamaño (10-25 μm) estructuras complejas multicélulas/tejidos
Pared celular rígida requiere transporte enzimas extracelulares	Paredes celulares flexibles fagocitosis partícula (organismo) absorción
Diversidad metabólica Fuentes de energía alternativas (luz, sustancias orgánicas, inorgánicas) Oxidantes alternativos (O_2 , metales, CO_2 , etc.)	Especialización metabólica inhalación de O_2 C orgánico como combustible

NOTA: Los organismos anucleados que se conocen como procariotas comparten algunas propiedades que nos permiten agruparlos en dominios funcionales muy diferentes de los de sus homólogos eucariotas.

de esta manera en procesos biológicos. En lo esencial, los procariotas rechazan la biología a fin de optimizar sus habilidades químicas. El resultado de esta evolución es hoy fácilmente visible mediante el análisis genómico de los procariotas, en quienes generalmente un alto porcentaje de los genes estructurales se involucra en los procesos de la membrana y del transporte.

En muchos casos hasta 25% o más del genoma se dedica a los procesos de la interfase entre la superficie celular y el medio ambiente, y tiene que ver en la absorción, transporte o el metabolismo de las sustancias químicas ambientales. En los eucariotas, por otro lado, gran parte del ADN participa en tareas de tipo más biológico, tales como el desarrollo, la regulación y la diferenciación. Finalmente, los procariotas son metabólicamente muy diversos, mientras que las habilidades al respecto de los eucariotas son muy limitadas. Los procariotas han desarrollado un repertorio metabólico que les permite utilizar casi cualquier sustancia química energéticamente útil que exista en abundancia en la Tierra.⁵

⁵ K. H. Nealson, "Sediment Bacteria: Who's There, What are they Doing, and What's New?", *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 25: 403-434, 1997; K. H. Nealson, "The Limits of Life on Earth and Searching for Life on Mars", *Journal of Geophysical Research*, 102: 23675-23686, 1997; K. H. Nealson,

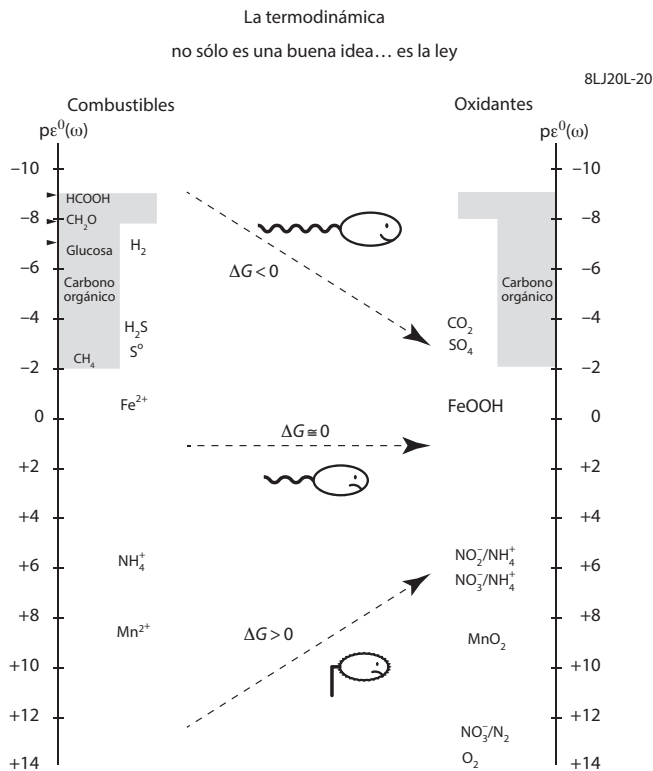


FIGURA XIII.5. Fuentes de energía y de oxidantes en la Tierra.

Se muestran en el lado izquierdo algunas de las fuentes de energía de que disponen los organismos en la Tierra; en la parte de arriba las más ricas en energía, y en la de abajo las menos ricas. En el lado derecho se muestran los oxidantes disponibles para la quema de estos combustibles biológicos. Los combustibles y oxidantes que comúnmente utilizan los eucariotas son la glucosa y el oxígeno, y los que utilizan los procariotas son $HCOOH$, CH_2O , H_2 , H_2S , CH_4 , S^0 , Fe^{2+} , NH_4^+ , Mn^{2+} y CO_2 , SO_4 , $FeOOH$, NO_2^-/NH_4^+ , NO_3^-/NH_4^+ , MnO_2 , NO_3^-/N_2 , respectivamente.

Siendo oportunistas, estos ingeniosos químicos simplemente han cosechado todas las sustancias aprovechables del mercado químico, aprendiendo a utilizar casi todos los tipos de fuentes de energía orgánicas e inorgánicas. Por ejemplo, veamos en la figura XIII.5 cuáles son las fuentes principales de energía hoy disponibles en la Tierra.

"Post-Viking Microbiology: New Approaches, New Data, New Insights", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 29: 73-93, 1999.

En el lado izquierdo podemos ver las fuentes de energía potenciales, desde la más rica, arriba, hasta la menos rica, abajo. En el lado derecho están los oxidantes que pueden utilizarse para “quemar” estos combustibles, encontrándose el mejor oxidante (el oxígeno) abajo y el peor (bióxido de carbono) más arriba. Puesto que es necesario “quemar” un combustible para que suministre energía, podemos calcular la cantidad de energía disponible simplemente mediante la conexión de un combustible dado con un oxidante. Si la flecha que conecta con un llamado par redox se inclina hacia abajo, esto indica que la combinación contiene energía, siendo casi seguro que existe uno o más microorganismos capaces de usar esa combinación. En contraste, los eucariotas sólo utilizan unos cuantos compuestos de carbono y como oxidante sólo el oxígeno molecular —sacrifican la diversidad en aras de la alta producción de energía, mientras que los procariotas ocupan los diversos hábitats de baja energía—.

Pero ¿qué podemos decir respecto a la resistencia de los procariotas? El vocablo “extremófilo” se deslizó en nuestro vocabulario durante el pasado decenio: fue acuñado para nombrar a los organismos que son resistentes a, y hasta prosperan en, condiciones extremas. Como se ve en la figura XIII.6, los extremófilos pueden ser resistentes a las condiciones extremas químicas (pH, salinidad), físicas (temperatura, sequedad) o nutricionales, y en la naturaleza es raro que un organismo se enfrente a tan sólo una condición extrema. Por ejemplo, a temperaturas elevadas es común encontrar condiciones anóxicas, ya que la solubilidad del oxígeno es muy baja en el agua caliente. Además, por causa de las altas tasas de evaporación, los sistemas calientes con frecuencia se asocian a la elevada salinidad. Así, las lagunas en los desiertos con frecuencia son de elevado pH y gran salinidad, puesto que el agua al evaporarse e interactuar con los minerales atrapados allí produce condiciones extremas.

Los extremófilos más notorios acaso son los que se encuentran en los hábitats de elevada temperatura —las bacterias hipertermófilas capaces de crecer a 100 °C y más, siendo la máxima temperatura que pueden soportar de 115 °C, muy por arriba del punto de ebullición del agua—. Estos organismos sólo se desarrollan bajo presión donde el agua esté estable, y mueren por congelamiento a temperaturas tan altas como 80 °C, temperaturas que a los seres humanos les producirían severas quemaduras. Se conocen otras bacterias que viven en salmueras saturadas, y en condiciones de pH tan bajas como -1 y tan altas como +11.

Una de las estrategias de la vida que con frecuencia aparece cuando las cosas se vuelven difíciles es la del estilo de vida endolítico: la habilidad para asociarse con las rocas, ya sea en la superficie o justo debajo de ella. En el lago Mono de California,

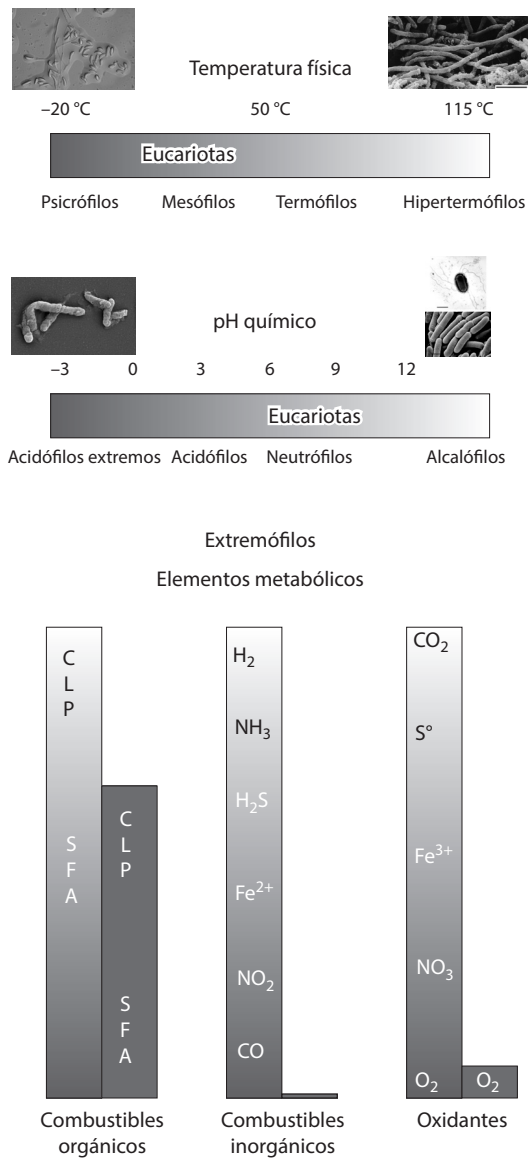


FIGURA XIII.6. *Extremófilos.*

Esta figura ilustra la gama de condiciones ambientales en que se encuentran los diversos tipos de extremófilos. Hay que señalar que estas condiciones pueden ser físicas, químicas o metabólicas. Es raro que únicamente exista en cada caso una sola condición.



FIGURA XIII.7. *La vida en las rocas.*

Aquí vemos los montículos de tufa (depósitos calcáreos) del lago Mono, en California, donde viven comunidades de organismos. Este hábitat se caracteriza por el alto pH (cerca de 10) y elevada salinidad, pero en las rocas, encima del nivel del agua y protegidas del sol por las capas calcáreas, vive en armonía con otras especies procariotas una población saludable y ubicua de cianobacterias fotosintéticas. Fotografías de Kennet_A_Meisner (izq.) y jbhann (der.)

que es alcalino, los montículos de tufa que por doquiera se ven y que al parecer están muertos, rebosan de vida (figura XIII.7).⁶ Unos cuantos milímetros bajo la superficie de la roca se encuentran poblaciones de cianobacterias que se ocultan del candente sol, creciendo de modo óptimo bajo la luz filtrada. Situación similar existe en muchas rocas y suelos de desiertos ardientes y fríos, donde es posible encontrar microbios fotosintéticos bajo la superficie de los estratos rocosos.⁷

Además de los extremos físicos y químicos antes anotados, yo quisiera señalar otra propiedad de los procariotas que aquí llamaré la extremofilia nutricional. Dado que los eucariotas se limitan casi totalmente al desarrollo basado en el carbono orgánico y en el oxígeno como oxidante, cualesquier condiciones en que no exista el carbono orgánico o el oxígeno constituyen una situación que pone en peligro la vida. Sin embargo, para los procariotas tales medios son simplemente oportunidades para seguir viviendo, aunque con un sistema nutricional diferente.

⁶ H. Sun, K. H. Nealson y K. Venkateswaren, "Alkaliphilic and Alkalotolerant Actinomycetes Isolated from Mono Lake Tufa", *Abstracts from the 99th Annual Meeting of the American Society of Microbiologists*, ASM Press, Washington, 1999; H. Sun y K. H. Nealson, "Endolithic Cyanobacteria in Mono Lake", *Abstracts from the 99th Annual Meeting of the American Society of Microbiologists*, ASM Press, Washington, 1999.

⁷ E. Friedmann, "Endolithic Microorganisms in the Antarctic Cold Desert", *Science*, 215: 1045-1053, 1982; E. Friedmann, *Antarctic Microbiology*, Wiley Interscience, Nueva York, 1993.

Aunque no se puede saber con certeza *cuándo* surgió en la Tierra este tipo de diversidad metabólica, su sola existencia le obliga a cualquiera que quiera detectar la vida a incluir en la búsqueda esos hábitats “extremos” y a ampliar la definición de la vida a fin de abarcar habilidades metabólicas que hace sólo unos cuantos años se hubieran desechado sumariamente. La habilidad para desarrollarse con fuentes de energía como el monóxido de carbono, el hierro ferroso, el sulfito de hidrógeno o el hidrógeno implica que las bacterias podrían habitar mundos que los científicos en su búsqueda de la vida extraterrestre no tomaban en consideración anteriormente, y que tendrán que incluirse en las nuevas estrategias de detección.

Finalmente, hay que señalar respecto a los procariotas su tenacidad y habilidad para sobrevivir durante mucho tiempo. Hay muchos casos de bacterias que han sido reanimadas tras un prolongado periodo de almacenaje, pero acaso ninguno más dramático que el de las bacterias del permafrost antártico, donde en suelos que han permanecido congelados durante más de tres millones de años se han cosechado copiosas cantidades de bacterias vivientes. El doctor David Gillichinsky y sus colegas de Puschino, Rusia, han estado haciendo perforaciones en tales lugares ya desde hace muchos años, y diversos organismos han sido “reanimados” en las muestras que han obtenido cuidadosamente. No es inusual encontrar de 10^6 a 10^7 (uno a 10 millones) de bacterias viables en cada gramo de permafrost.⁸ Éstas no son bacterias (psicrófilas) que amen el frío y que se hayan adaptado a condiciones de congelamiento, sino simplemente organismos mesófilos que han estado atrapados dentro de un almacén de hielo durante millones de años.

Así, ahora que estamos a punto de viajar a otros cuerpos celestes en búsqueda de la vida, nos encontramos con que nuestra definición de la habitabilidad es muy diferente de la que teníamos sólo hace unos cuantos años. Por lo tanto, tendremos que: *a)* tomar en cuenta que las condiciones físicas y químicas que la vida puede tolerar son más amplias de lo que antes pensábamos; *b)* examinar las fuentes de energía existentes y buscar cuidadosamente las formas de vida que puedan utilizar tales energías; *c)* estar preparados para detectar sutiles formas de vida unicelulares que acaso no sean obvias al principio, incluso cuando examinemos los lugares donde la vida se pudo preservar en forma latente.

¿Será posible, a partir de estas “enseñanzas de la Tierra”, diseñar una estrategia que nos permita detectar la vida con algún grado de confianza? El éxito de cualquier búsqueda dependerá de la habilidad para definir los rasgos generales de la vida, para desarrollar los métodos de medición de estos rasgos generales y

⁸ T. Shi *et al.*, “Characterization of Viable Bacteria from Siberian Permafrost by 16S rDNA Sequencing”, *Microbial Ecology*, 33: 169-179, 1997.

para utilizar estos métodos en la detección remota, en las investigaciones *in situ* y en el análisis de las muestras recuperadas.

Las investigaciones de la vida terráquea sugieren que la evolución metabólica, uno de los puntos claves en el fenómeno de la globalización de la vida, ya se encontraba en pleno desarrollo hace más de 500 millones de años. La mayor parte de la geología de la Tierra y muchas de sus propiedades atmosféricas ya existían por entonces. Si queremos detectar la vida en otros lugares, debemos tener presente que no podemos estar seguros de que cualquier planeta en particular haya evolucionado hasta alcanzar la fase avanzada que hoy vemos en la Tierra; por lo tanto, es necesaria una perspectiva histórica en el desarrollo de una estrategia para la detección de la vida. Para decirlo de otra manera, tenemos que conocer la historia primitiva de un planeta a fin de enmarcar adecuadamente la búsqueda de la vida.

Ya que la Tierra es el único lugar donde estamos seguros de que la vida existe, tendrá que fungir como nuestro laboratorio para la planificación de la estrategia de la búsqueda. La estrategia general aún se encuentra en las fases iniciales de su planeación, pero involucra tres fases: *a)* el desarrollo de biofirmas no centradas en lo terráqueo para la detección de la vida; *b)* el proceso de someterlas a prueba con muestras terráneas a fin de comprobar su viabilidad, y *c)* la utilización de estas biofirmas y pruebas en el análisis de las muestras extraterrestres.

Para la mayoría de los biólogos actuales este proceso en su totalidad significa una nueva empresa que plantea nuevas preguntas. Es raro que a un biólogo se le entregue una piedra y se le pregunte: “¿Está viva?” o “¿puede usted probar a partir de esta muestra si alguna vez existió la vida en la Tierra?” Pero a esto nos enfrentaremos dentro de unos pocos años, cuando las muestras de Marte sean transportadas a la Tierra. De hecho, si un planeta rebosa de vida, como la Tierra, esto no sería difícil incluso con piedras muy antiguas. Sería relativamente fácil saber que la Tierra estuvo (y está) viva desde casi cualquier distancia, en especial si se dispusiera de las muestras para analizarlas física y químicamente. Sin embargo, si los signos de la vida son sutiles o desconocidos, entonces la tarea es mucho más difícil.

Esta dificultad se demuestra por la actual controversia en torno al ya famoso meteorito marciano ALH 84001. Hace cuatro años se anunció que esta roca de 4 500 millones de años contenía evidencias de la vida en Marte. Pero incluso hoy, tras una larga investigación, el jurado no ha regresado con la decisión respecto a la validez de la evidencia. Los problemas se relacionan con muchos aspectos, incluidos el de la edad de la muestra, el de la dificultad de diferenciar las señales marcianas de las causadas por la contaminación terráquea, y el de la definición misma de la vida y de cómo se prueba que está (o estuvo) presente en el meteori-

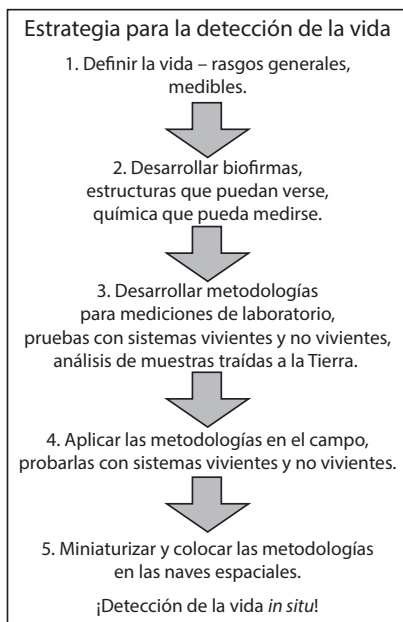


FIGURA XIII.8. *La búsqueda de la vida en el universo.*

Buscar la vida sin saber cómo es representa uno de los verdaderamente grandes retos que enfrentan los científicos humanos. Se deberán formular definiciones fundamentales de la vida y desarrollar biofirmas para ayudar en la búsqueda, biofirmas que no se basen en las moléculas de tipo terráqueo conocidas, pero que, sin embargo, nunca dejen de detectar la vida de tipo terráqueo si llegaran a encontrarla.

to. Lo que este meteorito en realidad nos ha enseñado es que tenemos que aprender mucho sobre cómo diferenciar la vida de la no vida.

Puede ser que los biólogos no sean el grupo de científicos más adecuado para responder a la pregunta “¿Existe la vida en esta roca?” En mis tiempos de estudiante de biología, jamás me preguntaron algo parecido. Más bien, me entregaban una rana y me preguntaban: “¿Cómo funciona?”, o “¿de qué está hecha?” Hoy en día las preguntas han cambiado; por ejemplo, “¿cuáles son los genes que contiene y cómo funcionan?”, pero el problema general sigue siendo que los biólogos estudian la vida que ya saben cómo detectar, no buscan detectar la vida que desconocen. Es ésta una cuestión de naturaleza inherentemente interdisciplinaria, y acaso los científicos mejor preparados para abordarla son aquellos que estén dispuestos a definir la vida en términos generales, abarcando toda la vida en la Tierra, pero no excluyendo la vida constituida por distintos tipos de moléculas.

En cuanto grupo, nosotros los biólogos estamos muy bien preparados para detectar la vida tal como la conocemos, sobre todo porque ya entendemos su química muy bien. Hay moléculas que se pueden detectar con una tremenda precisión. Podemos encontrar una sola bacteria en un litro de agua. Sin embargo, si tales moléculas indicadoras claves no se encuentran presentes, la búsqueda se torna mucho más difícil y desde luego no se puede depender de la probabilidad de que la vida en otros lugares contenga las mismas moléculas claves. El problema entonces asume un aspecto diferente: puesto que dependemos de los indicadores de la vida que se centran en la vida terráquea, nosotros los biólogos acaso seamos involuntariamente los menos preparados para detectar la vida cuya estructura química sea diferente.

Con el propósito de poder hacerlo, nuestro grupo de astrobiología enfoca las que a nuestro parecer son las dos propiedades fundamentales de toda vida, la estructura y la composición química, que es posible detectar y medir. Históricamente, las estructuras han sido la clave que los paleontólogos utilizan para identificar las formas de vida del pasado en la Tierra. Las estructuras caracterizan la vida como la conocemos y también deberían caracterizar todas las formas de vida que encontremos. No podemos saber por adelantado cuáles son la naturaleza de las estructuras o la escala de su dimensión que puedan guiar la búsqueda, pero sí esperamos que haya elementos estructurales asociados con todas las formas de vida. Cuando uno explora un nuevo lugar, la dependencia en estructuras conocidas tiene diversos riesgos potenciales, incluido el hecho de que uno podría descartar ciertas estructuras simplemente porque no le son familiares. Será importante estar abiertos a la posibilidad de encontrar diferentes tipos y tamaños de estructuras en las muestras provenientes de nuevos lugares.

Aunque creamos que la vida estará vinculada a elementos estructurales, la estructura por sí misma no será una prueba de la existencia de la vida. Sin embargo, ligar el análisis estructural a la determinación del contenido químico bien puede proporcionar una herramienta para deducir con seguridad la presencia de la vida. En la Tierra, la vida se basa en el carbono y posee una peculiar y notablemente constante composición (hidrógeno, nitrógeno, fósforo, oxígeno, carbono, etc.) que se encuentra notablemente desequilibrada en relación con la abundancia de los elementos en la corteza de nuestro planeta. Casi por definición, la vida es una fuente de entropía negativa: una estructura compuesta de grupos de monómeros y polímeros químicos cuya presencia no es predecible con base en la termodinámica, dada la abundancia de sustancias químicas en la atmósfera y en la corteza de la Tierra. La naturaleza exacta de estos grupos químicos no es tan

importante como el hecho de que estén muy desequilibrados en relación con el entorno geológico. Por lo tanto, si se dispusiera de los métodos para el análisis de la química de las estructuras en la escala o escalas de dimensión apropiadas, entonces la posibilidad de detectar la vida existente (o incluso extinta) aumentaría mucho. Aunque hay otras propiedades de la vida que pueden medirse (tales como la replicación, la evolución y el intercambio de energía con el medio ambiente), nosotros creemos que si la vida en efecto existe o existió entonces se podrá detectar mediante la existencia de estructuras con químicas distintivas.

En última instancia, nos encantaría obtener muestras de muchos lugares de nuestro Sistema Solar y aun de más allá, pero, para ser realistas, probablemente necesitaremos hacer mediciones tanto remotas como *in situ*, quedando satisfechos con éstas como indicadoras de vida. En la medida que mejore nuestra habilidad para medir estructuras y químicas, la posibilidad de responder a la pregunta de si existe o no la vida fuera de la Tierra también mejorará. Habremos de necesitar una estrategia para la exploración, la recolección de muestras y, finalmente, el análisis de las muestras. Dada la cantidad de otros sistemas solares que sabemos que existen, y la cantidad de planetas que emergen en torno a lejanas estrellas, sería improbable que no encontremos la vida en otros lugares. El desarrollo de la estrategia adecuada y la definición de las condiciones que sustentan y no sustentan la vida serán claves en el descubrimiento final de la vida extraterrestre. Con la estrategia y el planteamiento adecuados no es una cuestión de si la habremos de descubrir, sino de cuándo lo haremos.

BIBLIOGRAFÍA

- Friedmann, E., "Endolithic Microorganisms in the Antarctic Cold Desert", *Science*, 215: 1045-1053, 1982.
- , *Antarctic Microbiology*, Wiley Interscience, Nueva York, 1993.
- Glombek, M. P., "A Message from Warmer Times", *Science*, 283: 1470-1471, 1999.
- Haynes, N. R., "The NASA Mars Exploration Program", 49th International Astronautical Congress, 28 de septiembre-2 de octubre, 1998, Melbourne, Australia.
- Klein, H. P., "The Viking Mission and the Search for Life of Mars", *Reviews of Geophysics*, 17: 1655-1662, 1979.
- Knoll, A. H., "The Early Evolution of Eukaryotes: A Global Perspectives", *Science*, 256: 622-627, 1992.
- Margulis, L., *Symbiosis in Cell Evolution*, W. H. Freeman, San Francisco, 1981.

- McKay, C. P., E. I. Friedmann, R. A. Wharton y W. L. Davies, "History of Water on Mars: A Biological Perspective", *Advances in Space Research*, 12: 231-238, 1992.
- Mojzsis, S. J., G. Arrhenius, K. D. McKeegan, T. M. Harrison, A. P. Nutman y C. R. L. Friend, "Evidence for Life on Earth before 3800 Million Years Ago", *Nature*, 384: 55-59, 1996.
- Nealson, K. H., "Post-Viking Microbiology: New Approaches, New Data, New Insights", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 29: 73-93, 1999.
- , "Sediment Bacteria: Who's There, What are they Doing, and What's New?", *Annual Review of Earth and Planetary Science*, 25: 403-434, 1997.
- , "The Limits of Life on Earth and Searching for Life on Mars", *Journal of Geophysical Research*, 102: 23675-23686, 1997.
- Olsen, G. J., C. R. Woese, R. Overbeek, "The Winds of Evolutionary Change: Breathing New Life into Microbiology", *Journal of Bacteriology*, 176: 1-6, 1994.
- Pace, N., "New Perspective on the Natural Microbial World: Molecular Microbial Ecology", *American Society of Microbiology News*, 62: 463-470, 1996.
- Rye, R., y H. D. Holland, "Paleosols and the Evolution of the Atmospheric Oxygen: A Critical Review", *American Journal of Science*, 298: 621-672, 1998.
- Schidlowski, M., P. W. U. Appel, R. Eichmann y C. E. Junge, "Carbon Isotope Geochemistry of the 3.7 x 10⁹-yr-old Isua Sediments, West Greenland: Implications for the Archaean Carbon and Oxygen Cycles", *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 43: 189-199, 1979.
- Schopf, J. W., y C. Keim, *The Proterozoic Biosphere*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
- Shi, T., R. H. Reves, D. A. Gilichinsky y E. Friedmann, "Characterization of Viable Bacteria from Siberian Permafrost by 16S rDNA Sequencing", *Microbial Ecology*, 33: 169-179, 1997.
- Stahl, D. A., "The Natural History of Microorganisms", *American Society of Microbiology, Series B*, 59: 609-613, 1993.
- Sun, H., K. H. Nealson, "Endolithic Cyanobacteria in Mono Lake", *Abstracts from the 99th Annual Meeting of the American Society of Microbiologists*, ASM Press, Washington, 1999.
- Sun, H., K. H. Nealson y K. Venkateswaren, "Alkaliphilic and Alkalotolerant Actinomycetes Isolated from Mono Lake Tufa", *Abstracts from the 99th Annual Meeting of the American Society of Microbiologists*, ASM Press, Washington, 1999.
- Wilson, E. O., *Naturalist*, Island Press, Washington, 1994. [Versión en español: *El naturalista*, Debate, 1995.]
- Woese, C. R., "Bacteria Evolution", *Microbiology Review*, 51: 221-271, 1987.
- , "There must Be a Prokaryote Somewhere: Microbiology's Search for Itself", *Microbiology Review*, 58: 1-9, 1994.

Carol E. Cleland y Shelley D. Copley*

XIV. LA POSIBILIDAD DE VIDA MICROBIANA ALTERNATIVA EN LA TIERRA**

INTRODUCCIÓN

Encontrar una forma de vida cuya arquitectura molecular y cuya bioquímica sean diferentes de la vida que conocemos sería profundamente importante desde una perspectiva tanto científica como filosófica. Existen evidencias convincentes de que la vida conocida hoy en la Tierra comparte un ancestro universal común (LUCA, last universal common ancestor). Es improbable que LUCA haya sido la forma de vida primigenia en la Tierra, puesto que era una forma de vida sofisticada que ya poseía ácidos nucleicos y proteínas, así como complejos procesos metabólicos. En una palabra, la vida como la conocemos tan sólo representa un ejemplo de una fase relativamente avanzada de la vida. No se justifica generalizar a partir de un solo ejemplo toda la vida, en cualquier lugar y cualquier periodo donde sea posible encontrarla. De hecho, al no tener ejemplos adicionales de la vida, estamos en una posición análoga a la de un zoólogo que a partir de su experiencia con las cebras se esforzara en formular una teoría sobre los mamíferos. No es probable que se enfocara en sus glándulas mamarias, ya que sólo son características en las hembras. Sin embargo, las glándulas mamarias nos dicen más sobre lo que significa ser un mamífero que las largas manchas transversales que se observan tanto en los machos como en las hembras de las cebras. Encontrar una forma de vida que tuviera una arquitectura molecular y una bioquímica distintas nos ayudaría a entender la naturaleza de la vida en general: los procesos que condujeron a su emergencia y las diversas formas que ha podido asumir, ya sea en la Tierra primitiva o en otro lugar del universo. Además, tendría pro-

* Carol Cleland agradece las útiles discusiones que sostuvo con los investigadores del Centro de Astrobiología, de España, y con Susan Jones, profesora del Departamento de Historia de la Universidad de Colorado, en Boulder. Las dos agradecemos a Lynn Rothschild por sus atentos comentarios respecto a una primera versión de este ensayo. Este trabajo fue respaldado en parte por una beca de la NASA para el Centro de Astrobiología de la Universidad de Colorado.

** Este capítulo apareció originalmente en *International Journal of Astrobiology*, 4: 165-173, 2005.

fundas implicaciones filosóficas en nuestra comprensión de nuestro sitio en el universo.

Cuando los científicos hablan de buscar la “vida como *no* la conocemos”, comúnmente piensan en la vida extraterrestre. La cuestión de la apariencia de la vida en otros lugares del universo y de cómo podríamos detectarla remotamente o *in situ* con la ayuda de robots ha sido objeto de considerable interés. Sin embargo, existe otra posibilidad que poco se considera, y ésta consiste en que la misma Tierra contemporánea pudiera albergar formas de vida que son fundamentalmente diferentes en el nivel molecular de la vida como actualmente la conocemos.

Se han publicado discusiones sobre el origen de la vida en la bibliografía científica a través de muchos decenios (para un excelente resumen véase Fry).¹ Aunque la mayoría de los investigadores suponen que la vida se originó tan sólo una vez en la Tierra, unos cuantos pioneros han considerado la idea de los orígenes múltiples de la vida: Shapiro² ha sugerido que la vida conocida pudo haberse originado más de una vez en la Tierra. Sleep y sus colegas³ han sugerido que la vida conocida pudo haber emergido y haberse extinguido varias veces en la Tierra primigenia en el periodo del “fuerte bombardeo”. Wächtershäuser⁴ ha sugerido que formas primitivas de metabolismo precedieron la vida celular e incluso podrían persistir en hábitats que no pueden ocupar los organismos heterótrofos. Aquí discutimos detalladamente una posibilidad que poco se ha considerado. Sugerimos que la vida, si es que tuvo más de un origen en la Tierra, pudo haber producido protoorganismos que en el nivel molecular fueron fundamentalmente distintos de los predecesores de nuestra forma de vida; además, que los descendientes microbianos de algunos de estos protoorganismos aún pueden existir en la Tierra actualmente y aún no han sido identificados. Según nosotros, esta idea que contradice el paradigma de que la vida en la Tierra actual descende de un ancestro común no debe descartarse. Davies y Lineweaver la han discutido, aunque sin detallar los aspectos químicos y biológicos, en un trabajo reciente que intenta cuantificar la probabilidad de la emergencia de múltiples formas de vida en la Tierra (véase *infra*).⁵

¹ I. Fry, *The Emergence of Life on Earth: A Historical and Scientific Overview*, Rutgers University Press, Londres, 2000.

² R. Shapiro, *Origins: A Skeptic's Guide to the Creation of Life on Earth*, Bantam Books, Nueva York, 1986.

³ N. H. Sleep *et al.*, “Annihilation of Ecosystems by Large Asteroid Impacts on the Early Earth”, *Nature*, 342: 139-142, 1989.

⁴ G. Wächtershäuser, “Groundworks for an Evolutionary Biochemistry: The Iron-Sulphur World”, *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 58: 85-201, 1992.

⁵ P. C. Davies y C. H. Lineweaver, “Finding a Second Sample of Life on Earth”, *Astrobiology*, 5 (2): 154-163, 2005.

¿CÓMO PODRÍA SER UN TIPO DE VIDA
LIGERAMENTE DIFERENTE?

La vida como hoy la conocemos en la Tierra comparte un número de características fundamentales en el nivel molecular. Contiene macromoléculas catalíticas y estructurales compuestas de proteínas y un material genético compuesto de ácidos nucleicos. Las proteínas y el ADN evidentemente cumplen muy bien con sus respectivas funciones, y las muchas estructuras alternativas que se han examinado no son capaces de proporcionar la estructura adecuada para tales funciones. Sin embargo, también es evidente que algunos de los componentes moleculares pudieron haber sido diferentes. De hecho, sigue sin resolverse la cuestión de si toda la vida (dondequiera que se pueda encontrar) se compone de proteínas y ácidos nucleicos. Es difícil contestar esta pregunta fuera del contexto de una teoría general de los sistemas vivientes, la cual aún no tenemos. Aquí no exploramos la posibilidad de formas de vida que sean radicalmente diferentes en el nivel molecular, porque como lo veremos más adelante, la detección de incluso una forma de vida ligeramente diferente es un tremendo reto.

La vida conocida utiliza ácidos nucleicos para almacenar su información hereditaria. El ADN cumple bien con esta función por diversas razones. Primero, tienen dos hebras, y la resultante redundancia puede proporcionar la correcta información secuencial en el caso de que una hebra del ADN se dañe y deba repararse. El espinazo polianiónico permite que el ADN adopte una estructura extendida que facilita la replicación. Es importante que a esta estructura extendida no le afecte la secuencia exacta de las bases en el ADN.⁶ Finalmente, la interacción entre las dos hebras complementarias por mediación de las interacciones de los enlaces del hidrógeno entre las bases Watson-Crick, es lo suficientemente fuerte como para proporcionar el reconocimiento molecular y la integridad estructural, pero no tan fuerte como para que impida que las hebras se separen con facilidad a fin de permitir la replicación. Se han invertido muchos esfuerzos en la exploración de estructuras alternativas para el polímero genético. Se ha explorado la posibilidad de estructuras diferentes para el espinazo, así como del empleo de azúcares diferentes, pero con poco éxito en relación con la capacidad del ADN para formar una estructura extendida de dos hebras, sean cuales sean las bases en el polímero.⁷ Sin

⁶ S. A. Benner y D. Hutter, "Phosphate, DNA, and the Search for Nonterran Life: A Second Generation Model for Genetic Molecules", *Bioorganic Chemistry*, 30: 62-80, 2002.

⁷ P. S. Miller *et al.*, "Biochemical and Biological Effects of Nonionic Nucleic Acid Methylphosphonates",

embargo, el tipo de las bases utilizadas en el ADN es una característica que pudo haber sido sustancialmente distinta. Benner y sus colegas⁸ han explorado la posibilidad de pares de bases diferentes, demostrando que varios pares de bases alternativos podrían acomodarse en el ADN dúplex. Por añadidura, la vida como la conocemos emplea un código genético en tripletes, aunque el código no es universal —existen algunas variantes en las asignaciones de los codones, particularmente en las mitocondrias y los ciliados—. Puede considerarse la posibilidad de códigos que utilicen un número diferente de bases o diferentes tamaños de codones (véase cuadro XIV.1). Sin embargo, si suponemos que se requieren aproximadamente 20 aminoácidos para crear buenas estructuras de proteínas, entonces la mayoría de los códigos posibles que se mencionan en el cuadro XIV.1 tienen una capacidad de codificación demasiado pequeña o demasiado grande (situación ésta que probablemente introduciría demasiada complejidad en el proceso de la traducción). Sólo un código en tripletes que utiliza cuatro bases y un código en dobletes que utiliza seis bases poseen una capacidad de codificación en el rango adecuado.

La vida existente en la Tierra utiliza las proteínas para la mayoría de las funciones estructurales y catalíticas. Las proteínas son particularmente idóneas para tales funciones, gracias a las propiedades estructurales de los polímeros de los aminoácidos. El espinazo de poliamida de las proteínas es neutral, a diferencia del espinazo de los ácidos nucleicos, y por lo tanto el polímero puede doblarse y formar estructuras globulares. La planaridad de las funciones de la amida en el espinazo restringe la rotación en torno al enlace C-N, y por lo tanto proporciona algunas restricciones en el número de las conformaciones que se pueden adoptar.

Biochemistry, 20: 1874-1880, 1981; Z. Huang, K. C. Schneider y S. A. Benner, "Oligonucleotide Analogs with Dimethyl-Sulfide, -Sulfoxide and -Sulfone Groups Replacing Phosphodiester Linkages", en S. Agrawal (comp.), *Methods in Molecular Biology*, Rowman y Littlefield, 1993, pp. 315-353; C. Richert, A. L. Roughton y S. A. Benner, "Nonionic Analogs of RNA with Dimethylene Sulfone Bridges", *Journal of the American Chemical Society*, 118: 4518-4531, 1996; A. Eschenmoser, "Chemical Etiology of Nucleic Acid Structure", *Science*, 284: 2118-2123, 1999; S. A. Benner y D. Hutter, *op. cit.*; P. M. Reddy y T. C. Bruice, "Solid-phase Synthesis of Positively Charged Deoxynucleic Guanidine (DNG) Oligonucleotide Mixed Sequences", *Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters*, 13: 1281-1285, 2003.

⁸ J. A. Piccirilli *et al.*, "Extending the Genetic Alphabet: Enzymatic Incorporation of a New Base Pair into DNA and RNA", *Nature*, 343: 33-37, 1990; S. A. Benner, "Expanding the Genetic Lexicon: Incorporating Non-Standard Amino Acids into Proteins by Ribosome-Based Synthesis", *Trends in Biotechnology*, 12: 158-163, 1994; S. A. Benner, "Understanding Nucleic Acids Using Synthetic Chemistry", *Accounts of Chemical Research*, 37: 784-797, 2004; S. A. Benner y C. Y. Switzer, "Chance and Necessity in Biomolecular Chemistry: Is Life as We Know It Universal?", en H. Frauenfelder, J. Deisenhofer y P. J. Wolynes (comps.) *Simplicity and Complexity in Proteins and Nucleic Acids*, Dahlem University Press, Berlín, 1999, pp. 339-363; C. R. Geyer, T. R. Battersby y S. A. Benner, "Nucleobase Pairing in Expanded Watson-Crick-like Genetic Information Systems", *Structure*, 11: 1495-1488, 2003.

CUADRO XIV.1. *Número de codones diferentes que se pueden utilizar en las diversas combinaciones de pares de bases y tamaños de codones*

<i>Número de pares de bases</i>	<i>Número de posiciones del codón</i>			
	2	3	4	5
1	4	8	16	32
2	16	64	256	1 024
3	36	216	1 296	7 776
4	64	512	4 096	32 768

Además, el patrón repetitivo de los donantes y aceptores de enlaces de hidrógeno permite las interacciones a lo largo de la hebra, promoviendo la formación de estructuras secundarias estables, tales como las hélices alfa y las hojas beta. El acoplamiento entre los aminoácidos es muy estable, pero no demasiado; puede ser hidrolizado fácilmente por las enzimas para permitir el recambio de las proteínas dentro de las células. Esta propicia combinación de propiedades se debe a los enlaces de amidas que vinculan a los aminoácidos en el polímero; los polímeros vinculados por el éster, el tioéster, el éter o los enlaces C-C carecerían de una o más de estas propiedades.

La vida como la conocemos fabrica sus proteínas primordialmente a partir de los mismos 20 aminoácidos.⁹ No obstante, hay muchos otros aminoácidos que hubiera podido utilizar. Aunque es importante que el grupo de aminoácidos utilizado en las proteínas incluya un número suficiente de aminoácidos pequeños, grandes, hidrofílicos, hidrofóbicos, y cargados, posiblemente no sea crucial cuáles sean exactamente los aminoácidos de cada una de estas categorías. Además, los aminoácidos utilizados en la síntesis proteica por la vida conocida son todos aminoácidos L, y no hay razón para pensar que en su lugar no hubiera podido utilizar los aminoácidos D. De hecho, las proteínas que se han sintetizado químicamente a partir de los aminoácidos D se doblan correctamente y son funcionales.¹⁰

⁹ La selenocisteína se encuentra en un pequeño número de enzimas. Se incorpora en el ribosoma durante la síntesis proteínica utilizando un ARNT que identifica lo que normalmente sería un codón de terminación. La selenometionina se incorpora aleatoriamente en una proteína en lugar de la metionina. Las modificaciones postraduccion de algunos aminoácidos ocurren en casos específicos; algunos ejemplos incluyen la formación de dehidroalanina a partir de la serina, y del γ -carboxilglutamato a partir del glutamato.

¹⁰ R. C. L. Milton, S. C. Milton y S. B. Kent, "Total Chemical Synthesis of a D-Enzyme: The Enantiomers of HIV-1 Protease Show Demonstration of Reciprocal Chiral Substrate Specificity", *Science*, 245: 1445-1448, 1992; L. E. Zawadzke y J. M. Berg, "A Racemic Protein", *Journal of the American Chemical*

Dado que se pudieron elegir otras combinaciones de bases en el ADN, ¿por qué ha construido la forma de vida que conocemos sus proteínas y ácidos nucleicos con base en esa particular combinación de componentes moleculares? De acuerdo con nuestra actual comprensión de la química y de la biología molecular, la mejor explicación es que tales componentes fueron el resultado de las contingencias químicas y físicas existentes en la Tierra primitiva. Si las circunstancias hubieran sido pertinentemente diferentes, también lo hubiera sido la vida en la Tierra. Tal cosa sugiere una posibilidad interesante. Acaso diversos lugares en la Tierra primigenia pudieron propiciar la formación de la vida. Se han propuesto varios sitios donde principalmente pudieron realizarse las reacciones químicas prebióticas que proporcionaron los componentes de la vida, por ejemplo, los respiraderos hidrotermales,¹¹ las superficies minerales¹² y los aerosoles orgánicos.¹³ Además, diversos aminoácidos fueron depositados en la Tierra tanto por los asteroides¹⁴ como por los cometas.¹⁵ Se han descubierto en los meteoritos mezclas racémicas de 70 aminoácidos, de los cuales sólo ocho fueron utilizados por la vida en la Tierra actual.¹⁶ Una nueva teoría que aún no se ha sometido a prueba propone que la síntesis de los aminoácidos pudo haber sido catalizada en la Tierra primitiva por dinucleótidos, una vez que surgieron las condiciones adecuadas para su producción.¹⁷ Es

Society, 114: 4002-4003, 1992; M. C. Fitzgerald *et al.*, "Total Chemical Synthesis and Catalytic Properties of the Enzyme Enantiomers L- and D-4-Oxalocrotonate Tautomerase", *Journal of the American Chemical Society*, 117: 11075-11080, 1995; L. E. Canne *et al.*, "The Total Chemical Synthesis of L- and D-Superoxide Dismutase", *Protein Engineering*, 10: 23, 1997.

¹¹ N. G. Holm y E. M. Anderson, "Hydrothermal Systems", en A. Brack (comp.), *The Molecular Origins of Life: Assembling Pieces of the Puzzle*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998; W. Martin y M. Russell, "On the Origins of Cells: A Hypothesis for the Evolutionary Transitions from Abiotic Geochemistry to Chemoautotrophic Prokaryotes, and from Prokaryotes to Nucleated Cells", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 358: 59-85, 2003.

¹² G. Wächtershäuser, "Before Enzymes and Templates: Theory of Surface Metabolism", *Microbiological Review*, 52: 452-484, 1988; A. G. Cairns-Smith, A. J. Hall y M. J. Russell, "Mineral Theories of the Origin of Life and an Iron-Sulfide Example", *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, 22: 161-180, 1992; G. Cody, "Transition Metal Sulfides and the Origin of Metabolism", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32: 569-599, 2004.

¹³ C. M. Dobson *et al.*, "Atmospheric Aerosols are Prebiotic Chemical Reactors", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97: 11864-11868, 2000.

¹⁴ J. Oró *et al.*, "Abundances and Distribution of Organogenic Elements and Compounds in Apollo 12 Lunar Samples", *Proceedings of Second Lunar Science Conference*, 2: 1913-1925, 1971; E. Anders, "Prebiotic Organic Matter from Comets and Asteroids", *Nature*, 342: 255-257, 1989; D. P. Glavin *et al.*, "Aminoacids in the Martian Meteorite Nakhla", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96: 8835-8838, 1999; O. Botta y J. Bada, "Extraterrestrial Organic Compounds in Meteorites", *Surveys in Geophysics*, 23: 411-467, 2002.

¹⁵ C. F. Chyba *et al.*, "Cometary Delivery of Organic Molecules to the Early Earth", *Science*, 249: 366-373, 1990.

¹⁶ A. C. Andersen y H. Haack, "Carbonaceous Chondrites: Tracers of the Prebiotic Chemical Evolution of the Solar System", *International Journal of Astrobiology*, 4: 12-17, 2005.

¹⁷ S. D. Copley, E. Smith y H. J. Morowitz, "A Mechanism for the Association of Amino Acids and

improbable que fueran idénticas las condiciones químicas en todas estas incipientes “cunas de la vida”. Así, ciertamente hubieran sido diferentes en los distintos lugares los componentes disponibles para la vida, así como la estabilidad de los elementos intermediarios cruciales, y los tipos de reacciones que pudieron catalizarse. Si las condiciones que propiciaron la emergencia de la vida se presentaron en varios sitios diferentes, entonces es posible que surgieran respectivamente diferencias en las biomoléculas de las formas de vida terráneas primigenias; acaso hubo comunidades de moléculas de ARN que se autorreplieron,¹⁸ o vesículas que contenían poblaciones de moléculas que se autorreprodujeron.¹⁹ La hipótesis de que la tierra primitiva albergó múltiples orígenes alternativos es por lo tanto compatible con nuestros actuales conocimientos químicos y biológicos sobre la naturaleza de la vida conocida. Como más adelante alegaremos, algunos de estos tipos de vida alternativos todavía podrían existir en la Tierra.

Es desde luego posible que el origen de la vida sea una cuestión extremadamente improbable, y que la vida se haya originado ya sea en la Tierra en una sola ocasión, ya sea en otra ubicación, llegando a la Tierra en un meteorito. Pero es importante tener presente que el desconocimiento de cómo la vida realmente se originó en la Tierra no respalda la aserción de que el origen de la vida haya sido cierto tipo de coincidencia cósmica; la ignorancia no puede sustentar ningún tipo de sabia alegación, excepto, acaso, la trivial afirmación de que simplemente no sabemos lo que sucedió. Además, en la medida que la ciencia opera sobre la base del principio rector de que los fenómenos naturales se pueden explicar a partir de los procesos naturales, equivale a admitir la derrota el apelar a sucesos no naturales, ya sean coincidencias cósmicas o creaciones sobrenaturales. Si la vida, al igual que otros fenómenos naturales, es el producto de procesos naturales que se dieron de acuerdo con ciertas constricciones químicas y físicas, entonces parece más probable que improbable que la Tierra primitiva haya albergado a más de un origen de la vida. Estos orígenes diferentes pudieron haber producido organismos primitivos cuyos componentes básicos eran diferentes en alguna de las maneras antes expuestas.

their Codons with the Origin of the Genetic Code”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102: 4442-4447, 2005.

¹⁸ W. Gilbert, “Origin of Life: The RNA World”, *Nature*, 319: 618, 1986; G. Joyce, “The Antiquity of RNA-Based Evolution”, *Nature*, 418: 214-221, 2002.

¹⁹ A. I. Oparin, *The Origin of Life on Earth*, Oliver & Boyd, Edimburgo, 1957; C. M. Dobson *et al.*, “Atmospheric Aerosols as Prebiotic Chemical Reactors”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97: 11864-11868, 2000.

¿PODRÍA COEXISTIR LA VIDA ALTERNATIVA
CON LA VIDA CONOCIDA EN LA TIERRA?

Si la vida en la Tierra en efecto tuvo diversos orígenes, parece obvio que no todos éstos produjeron protoorganismos que evolucionaron hasta formar organismos más grandes como las plantas y los animales superiores. Sin embargo, hay pocos motivos para suponer que los procesos de la evolución inevitablemente producen organismos de gran tamaño. Los microbios constituyen la forma de vida más abundante de la Tierra. Se multiplican, en la mayoría de los casos, con más rapidez que los organismos grandes, lo cual les permite evolucionar más rápidamente en respuesta a las condiciones ambientales cambiantes. Los microbios explotan más recursos energéticos que los organismos multicelulares. Algunos microbios llevan a cabo la fotosíntesis, otros metabolizan las sustancias orgánicas y aún otros metabolizan sustancias inorgánicas como el amoníaco, el sulfuro de hidrógeno y el hierro. Prosperan en condiciones ambientales extraordinariamente diversas y se les puede encontrar en arroyos ácidos, en géiseres hirvientes, bajo la superficie terráquea a varios kilómetros de profundidad y en las áreas más frías de la Antártica.²⁰ En otras palabras, la diversidad biológica de los microbios es mucho mayor que la de los organismos multicelulares. De hecho, los organismos como las plantas y animales superiores parecen constituir, más que la norma, la excepción en la Tierra. Esto también podría suceder en todo el universo. Ward y Brownlee²¹ sostienen que las formas de vida microbianas probablemente son muy comunes en el universo, pero que los grandes organismos complejos no lo son. Así, el hecho de que no existan descendientes grandes y complejos de las primitivas formas de vida alternativas no cuenta como evidencia de que las formas de vida alternativas no existieron en los inicios de la historia de la Tierra o no pueden seguir existiendo hoy en día.

Se podría alegar que nuestra forma de vida es tan agresiva y evolutivamente robusta que cualquier otra forma de vida hubiera sido eliminada hace mucho. Este argumento cae por su propio peso ante la apreciación de la estructura y la dinámica de las comunidades microbianas. Los microbios raros, aunque no sean muchos, sobreviven exitosamente en los medios donde pululan los microbios comunes.²² De hecho, suelen participar con otros organismos en un sistema bioló-

²⁰ L. J. Rothschild y R. L. Mancinelli, "Life in Extreme Environments", *Nature*, 409: 1092-1101, 2001.

²¹ P. D. Ward y D. Brownlee, *Rare Earth*, Springer, Nueva York, 2000.

²² A. E. McCaig, L. A. Glover y J. I. Prosser, "Molecular Analysis of Bacterial Community Structure

gico interdependiente, produciendo o utilizando sustancias que son utilizadas, producidas o desechadas por otros microbios. Hay pocos motivos para suponer que los descendientes microbianos de un origen de la vida alternativo no puedan participar en semejante sistema. Por ejemplo, un microbio que usara en la síntesis proteínica únicamente aminoácidos D, en un hábitat que sólo contuviese aminoácidos L podría sobrevivir muy bien mediante una serie de racemasas que convirtieran los abundantes aminoácidos L en aminoácidos D. Las bacterias usualmente contienen racemasas para generar los aminoácidos D usados en la síntesis de la peptidoglicana.²³

Además, hay por lo menos dos escenarios alternativos de la evolución que son plausibles. Las nuevas formas de vida primigenia que más se diferenciaban de la vida conocida (por ejemplo, los casos en que las proteínas utilizaran una serie muy distinta de aminoácidos) pudieron haber gozado de una ventaja evolutiva. Para la vida conocida hubieran sido las más difíciles de metabolizar y por lo tanto hubieran sido la fuente nutritiva más inadecuada. Aquellos microorganismos no sólo pudieron haber sobrevivido, sino que pudieron evolucionar mediante el desarrollo de su propio sistema independiente de interrelaciones ecológicas de predadores y presas. Las nuevas formas de la vida primigenia en la Tierra también pudieron haber sobrevivido mediante la adaptación a medios que son menos acogedores para la vida microbiana conocida. En resumen, en vez de ser eliminadas, las nuevas formas de la vida primigenia pudieron haber evolucionado de tal manera que pudieron eludir la competencia con la vida conocida.

Otra hipotética objeción a la posibilidad de que nuevas formas de vida hayan descendido de un origen alternativo de la vida se basa en la transferencia genética lateral. La transferencia lateral de los genes difiere de la transferencia vertical ("normal") en que los genes se transfieren de padres a hijos. La transferencia lateral de los genes implica la transferencia del material genético desde un organismo a otro sin la replicación o la reproducción. Este material puede incorporarse en el genoma de la célula recipiente, cuyos vástagos la pueden heredar. Se sabe que la transferencia lateral de los genes ha desempeñado un papel significativo en la evolución de los microbios. De hecho, muchos microbiólogos creen que la vida

and Diversity in Unimproved Upland Grass Pastures", *Applied Environmental Microbiology*, 65: 1721-1730, 1999; J. R. Spear *et al.*, "Hydrogen and Bioenergetics in the Yellowstone Geothermal Ecosystem", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102: 2555-2560, 2005; J. J. Walker, J. R. Spear y N. Pace, "Geobiology of a Microbial Endolithic Community in the Yellowstone Geothermal Environment", *Nature*, 434: 1011-1014, 2005.

²³ T. Yoshimura y N. Esaki, "Amino Acid Racemases: Functions and Mechanisms", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 96: 103-109, 2003.

primigenia consistió en una comunidad de protoorganismos que compartían el material genético.²⁴ Si tal fuera el caso, entonces (como se alega) los diferentes organismos primitivos derivados de un origen de la vida diferente se habrían amalgamado en un *pool* homogéneo de protoorganismos primitivos que subsecuentemente habría evolucionado hasta formar la vida conocida.

Sin embargo, esta perspectiva pasa por alto algunas cuestiones importantes. La transferencia genética lateral, tal como la comprendemos actualmente, presupone similitudes significativas en los genomas de los microbios participantes. Los microbios conocidos no podrían incorporar partes de un genoma en sus genomas utilizando pares de bases alternativas, para no mencionar un número diferente de bases. Si los microbios derivados de orígenes de la vida alternativos intercambiaron biomoléculas tuvieron que hacerlo antes de que se estableciera el complejo ordenamiento cooperativo entre las proteínas y los ácidos nucleicos que es característico de la vida conocida. De hecho, los intercambios entre los protoorganismos pudieron haber sido indiscriminados, involucrando biomoléculas precursoras de todo tipo. En otras palabras, no es del todo claro que una comunidad de diversos protoorganismos derivados de orígenes de la vida alternativos pudiera haberse hibridado como una sola forma de vida que evolucionó hasta alcanzar la vida que conocemos. Dada nuestra limitada comprensión del origen y el primigenio desarrollo de la vida, no podemos descartar la posibilidad de que la vida conocida haya emergido de una mezcla fortuita de sustancias químicas, y de que las mezclas aleatorias de diferentes sustancias químicas hayan producido formas de vida microbiana alternativas.

Claro es que nada de lo anterior prueba que tales organismos jamás existieran, y aún menos que todavía existan. El meollo del asunto está en que muchos de los argumentos que comúnmente se oponen a la posibilidad de que así fuera o sea, no se pueden someter a un escrutinio serio. ¿Qué probabilidad tienen de existir? Responder a esta pregunta es difícil porque tan sólo conocemos una forma de vida y todavía no comprendemos el mecanismo mediante el cual ésta emergió. De hecho, Davies y Lineweaver²⁵ recientemente alegaron que no sólo es posible un origen alternativo de la vida en la Tierra, sino muy probable; según ellos la probabilidad es de 90%. Nosotros pensamos que este cálculo se basa en suposiciones cuestionables. Su argumento se basa en la asignación de una proba-

²⁴ C. R. Woese, O. Kandler y M. L. Wheelis, "Towards a Natural System of Organisms: Proposal for the Domains Archaea, Bacteria, and Eucarya", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87: 4576-4579, 1998.

²⁵ P. C. Davies y C. H. Lineweaver, *op. cit.*

bilidad de 50% a la emergencia de la vida en el curso de un periodo de 100 millones de años. Simplemente no podemos asignar tal probabilidad a partir del único dato que poseemos. No obstante, la posibilidad de la existencia de formas de vida alternativas no puede ser desechada con base en nuestros actuales conocimientos químicos y biológicos.

LAS LIMITACIONES DE LAS TECNOLOGÍAS ACTUALES

La posibilidad de que una primitiva forma de vida alternativa pudiera haber evolucionado hasta formar microbios que coexistan con la vida conocida como partes de una única biosfera unificada, o que existan en una biosfera paralela e independiente, no puede descartarse de buenas a primeras por una sencilla razón: nuestra tecnología actual no nos permitiría detectar una forma alternativa de vida.²⁶ Poseemos tres herramientas principales con que explorar el mundo microbiano. La primera es la microscopía. Desgraciadamente, la morfología de la mayoría de los microbios no eucariotas proporciona poca información sobre su clasificación filogenética o sus capacidades metabólicas, y no es probable que seamos capaces de advertir a simple vista las diferencias entre la vida normal y la vida alternativa. Además, la biología molecular nos ha enseñado que las similitudes superficiales de la morfología pueden disimular diferencias importantes en la arquitectura molecular y la bioquímica. Las arqueas nos proporcionan un ejemplo notable. La mayoría de las arqueas se parecen mucho a las bacterias bajo el microscopio. Sin embargo, son genética y bioquímicamente más diferentes de las bacterias que de los eucariotas. De hecho, el descubrimiento de que las arqueas sean tan distintas a las bacterias revolucionó la taxonomía biológica, pues los cinco reinos de la vida conocidos (animales, plantas, hongos, protistas y moneras [bacterias]) se remplazaron con tres dominios de la vida (Archaea, Eubacteria y Eucarya).²⁷ La moraleja es que la morfología no permite eliminar la posibilidad de los *microbios sombra*, es decir, los microbios cuya morfología se parece a la de los microbios de los dominios Archaea y Eubacteria, pero que en el nivel molecular tienen características fundamentalmente distintas. Esta posibilidad se ve respaldada por el hecho de que las presiones evolutivas pueden producir adaptaciones similares a partir de diferentes componentes biológicos. Es probable que las condiciones en la Tierra primigenia propiciaran el desarrollo de una morfología del tipo de la de

²⁶ Davies y Lineweaver mencionan este punto, pero no lo detallan.

²⁷ C. R. Woese, O. Kandler y M. L. Wheelis, *op. cit.*

los dominios Archaea y Eubacteria, del mismo modo que las condiciones en la Tierra propiciaron el desarrollo independiente de las alas de los insectos, aves y murciélagos. Por lo tanto sería un error concluir que cualquier microbio que se parezca a una bacteria bajo el microscopio sea una arquea o una eubacteria.

El poder del microscopio ha aumentado mediante el uso de tintes para la detección de elementos celulares específicos, tales como los ácidos nucleicos y los lípidos, y particularmente mediante las técnicas de la hibridación fluorescente *in situ* (FISH, fluorescence *in situ* hybridization), en que se usan sondas de oligonucleótidos para enfocar genes específicos a fin de identificar organismos específicos en una muestra ambiental. Sin embargo, estas técnicas no nos permiten concluir que todas las células que bajo el microscopio se puedan observar sean representantes de la vida conocida. Los tintes como el 4',6-diamidino-2-fenilindol (DAPI) se intercalan con los ácidos nucleicos de doble hebra, y probablemente teñirían los ácidos nucleicos de una forma de vida alternativa que en su material genético contuviera bases diferentes o un espinazo diferente. Los tintes para los lípidos no pueden distinguir entre las formas de vida conocidas y las alternativas, ya que la presencia de una membrana lipídica nada revela sobre los componentes del material genético y las proteínas que ésta contiene. Finalmente, la técnica de FISH como se practica comúnmente no es útil en absoluto, ya que sólo puede utilizarse para identificar las células que contienen un gen que se corresponde con la sonda empleada. Si una forma de vida alternativa tuviera un tipo distinto de material genético, las sondas de oligonucleótidos no hibridarían sus secuencias. Por lo tanto, la microscopía, incluso cuando se combina con herramientas moleculares estándar como la técnica de FISH, no puede eliminar la posibilidad de que ciertas formas de vida alternativas, incluso las que no son muy diferentes de las formas de vida conocidas, existan en las poblaciones naturales microbianas.

Otra herramienta que nos ha proporcionado la mayor parte de la información que tenemos sobre la composición genética y las propiedades fisiológicas de los microbios es la técnica de los cultivos. Cultivando grandes cantidades de un solo microbio, podemos determinar los componentes químicos de su material genético y estructural, la composición de su membrana, los tipos de procesos metabólicos que utiliza para obtener nutrientes y energía y, si suponemos que su material genético es el ADN, la secuencia de su genoma. Sin embargo, actualmente sólo podemos cultivar menos de 1% de los microbios que son visibles con el microscopio.²⁸ Los esfuerzos por mejorar las técnicas de cultivo están rindiendo

²⁸ N. R. Pace, "A Molecular View of Microbial Diversity and the Biosphere", *Science*, 274: 734-740, 1997.

frutos,²⁹ y esto puede mejorar dentro de pocos años. No obstante, las dificultades del cultivo de microbios sin duda limitan nuestra habilidad para detectar formas de vida microbiana alternativas, en particular porque probablemente requieran, más que las formas de vida microbiana conocidas, condiciones de cultivo especiales. Sería difícil determinar, si no se puede cultivar un microbio sombra, que utilice, por ejemplo, bases diferentes en su ADN o diferentes aminoácidos en sus proteínas.

La técnica de la amplificación por PCR (*polymerase chain reaction* o reacción en cadena de la polimerasa) del gen ARNr 16S obtenido en muestras ambientales ha proporcionado una herramienta extraordinariamente eficaz para la identificación de ejemplares no cultivables de las comunidades microbianas.³⁰ Sin embargo, la amplificación del ADN no es útil en la detección de nuevas formas de vida microbiana. El proceso requiere “cebadores universales” capaces de soportar la amplificación del gen ARNr 16S proveniente de uno de los tres dominios de la vida conocida. Su eficacia en la amplificación del ADN microbiano depende de que contenga regiones codificadoras que sean suficientemente similares a las del ADN de la vida conocida. Esto plantea un serio problema para la posibilidad de identificar los microbios sombra mediante la amplificación del ADN. Aun si una forma de vida alternativa tuviera el mismo ADN que conocemos, su ARN ribosomal (suponiendo que tenga ribosomas) podría ser tan diferente del ARN ribosomal de la vida conocida que no podría amplificarse mediante la técnica PCR. Además, si el espinazo, los azúcares o las bases del material genético fueran distintos en una forma de vida alternativa, su material genético no se podría amplificar utilizando la técnica PCR.

EL CUESTIONAMIENTO DEL PARADIGMA DE LA VIDA EN LA TIERRA

El paradigma de la biología moderna incluye la suposición de que la vida como la conocemos es la única forma de vida en la Tierra. Nuestra idea del papel que representan los paradigmas en la ciencia se la debemos a Thomas Kuhn.³¹ Según él, la investigación científica se lleva a cabo dentro de los confines de un paradigma. Además de las teorías, los paradigmas contienen los métodos, las instrumenta-

²⁹ J. R. Leadbetter, “Cultivation of Recalcitrant Microbes: Cells Are Alive, Well, and Revealing their Secrets in the 21st Century Laboratory”, *Current Opinion in Microbiology*, 6: 276-281, 2003.

³⁰ N. R. Pace, *op. cit.*

³¹ T. S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, The University of Chicago Press, Chicago, 1979.

ciones y las suposiciones subsidiarias que se relacionan con un campo específico. Aunque nuestra imagen teórica de la vida no excluye la existencia terráquea de las formas de vida microbianas alternativas, la suposición de que no existen se ha incorporado tácitamente en el paradigma de la biología moderna.

Los paradigmas son herramientas invaluableles en la investigación científica. Facilitan la construcción de las hipótesis, la planificación de los experimentos y la interpretación de los resultados. Sin embargo, Kuhn decía que los paradigmas a veces funcionan como anteojeras que entorpecen la exploración de la naturaleza al disuadir la realización de ciertas vías de investigación y al sesgar la interpretación de los resultados de las investigaciones. En consecuencia, algunos descubrimientos científicos importantes, y los adelantos científicos que de ellos dependen, pueden retrasarse muchos años. Kuhn ilustra este punto con varios ejemplos relacionados con la astronomía.³² El descubrimiento de Urano por William Herschel es particularmente significativo en nuestra discusión. Entre los años de 1690 y 1781 algunos de los astrónomos más eminentes de Europa anunciaron que habían visto una estrella en las posiciones que hoy sabemos que Urano ocupaba por entonces. Doce años después, Herschel observó el mismo objeto con un telescopio de reciente factura y más potente, quedando sorprendido por lo que vio. Magnificado, el objeto tenía la apariencia de un disco, cosa muy inusual en una estrella. Las investigaciones subsecuentes revelaron que el misterioso objeto se movía entre (y no con) las estrellas. Herschel concluyó que había descubierto un nuevo cometa. No obstante, las investigaciones subsecuentes revelaron que la órbita del objeto no correspondía con la de un cometa. Tras varios meses de investigaciones, otro astrónomo se aventuró a decir que la órbita era planetaria. Así, se descubrió que era una cosa muy diferente, es decir, un planeta, lo que se había visto como una estrella. Tras el descubrimiento de Urano rápidamente se descubrieron numerosos objetos de menor dimensión con órbitas planetarias. Kuhn especula que el pequeño cambio en el paradigma que el descubrimiento de Urano les impuso a los astrónomos, los preparó para ver objetos (sobre todo, los asteroides) que no habían visto antes pero que a pesar de todo siempre habían estado allí. Bajo esta luz, será aleccionador examinar algunos casos análogos en las ciencias biológicas. Estos casos son similares a los que discute Kuhn, en la medida que se trata de descubrimientos que en su época fueran asombrosos pero que sin embargo representaban fenómenos que habían estado presentes todo el tiempo y que no habían sido reconocidos porque no se correspondían con el paradigma predominante.

³² *Ibid.*, pp. 115-127.

En la Edad Media se atribuyeron las enfermedades infecciosas a cosas como el mal aire, las influencias sobrenaturales y los desequilibrios humorales, en conjunción con la constitución del cuerpo. Los fundamentos del moderno paradigma de las enfermedades infecciosas fueron establecidos por Louis Pasteur, Robert Koch y otros científicos contemporáneos hacia fines del siglo XIX.³³ Koch, el primero en identificar una bacteria (*Bacillus anthracis*) como la causa del ántrax, desarrolló las técnicas para cultivar y propagar las bacterias y para determinar que una bacteria específica es la causa de una enfermedad específica. El nuevo paradigma de Koch (la teoría de los gérmenes causantes de las enfermedades), aunque imponente, no fue capaz de establecer que las bacterias son la causa de todas las enfermedades infecciosas. En particular, sus técnicas no pudieron identificar los virus, que eran demasiado pequeños para que se pudieran ver con la tecnología existente en la época y que no se podían cultivar aisladamente. Sin embargo, los trabajos experimentales firmemente sugerían que ciertos agentes infecciosos desconocidos se involucraban en la transmisión de las enfermedades investigadas. El misterio quedó finalmente resuelto a principios del siglo XX mediante la conjunción de dos nuevas tecnologías. La microscopía electrónica permitió la visualización de las extremadamente diminutas partículas virales y su cultivo junto con células (en particular, en los huevos) permitió la propagación de los virus. En tiempos más recientes, nuestra noción de las causas de las enfermedades infecciosas ha sido nuevamente conmovida por el descubrimiento de los priones, partículas infecciosas proteináceas que causan enfermedades como el *scrapie* [encefalopatía espongiforme de ovejas y cabras] y la encefalopatía espongiforme bovina.³⁴ Los priones son sencillamente proteínas, y el hecho de que una proteína pudiera transmitir alguna enfermedad infecciosa fue tan revolucionario que a Stanley Prusiner se le otorgó el Premio Nobel en 1997 por el descubrimiento de los priones.

El descubrimiento de las arqueas nos proporciona otro ejemplo notable, ya que reveló la existencia de una forma de vida microbiana anteriormente desconocida y causó el derrocamiento de un paradigma biológico importante.³⁵ Antes de 1977 los científicos creían que los organismos vivientes caían dentro de dos categorías: las bacterias y los eucariotas. Este concepto tuvo su origen en las investigaciones microscópicas que revelaron que las bacterias eran pequeñas y no

³³ R. Reid, *Microbes and Men*, British Broadcasting Corporation, Londres, 1974; M. T. Madigan y J. M. Martinko, *Brock Biology of Microorganisms*, Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River, 2006.

³⁴ S. B. Prusiner, "Prions", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95: 13363-13383, 1998.

³⁵ C. R. Woese, "The Archaeal Concept and the World it Lives in: A Retrospective", *Photosynthesis Research*, 80: 361-371, 2004.

contenían orgánulos envueltos por membranas, mientras que las células eucariotas eran más grandes y contenían diversos orgánulos envueltos por membranas, incluidos el núcleo, la mitocondria y el retículo endoplásmico. La caída de este paradigma se inició modestamente en el decenio de 1960 cuando Carl Woese empezó a secuenciar el ARN ribosomal a fin de generar árboles filogenéticos basados en características moleculares. Cuando se estableció una amplia base de datos de las secuencias de ARNr, fue evidente que las secuencias ARNr de algunos microbios se agrupaban aparte, separándose de las bacterias y los eucariotas. A este grupo se le llamó inicialmente Archaea-bacteria, pero posteriormente se cambió el nombre por el de Archaea, puesto que se entendió que estos organismos son fundamentalmente diferentes de las bacterias y, de hecho, constituyen el tercer dominio de la vida. Las arqueas son similares a las bacterias morfológicamente; transcriben el ARN utilizando un mecanismo que es más similar al de los eucariotas que al de las bacterias; y la estructura de su pared celular es marcadamente distinta de la estructura de la pared celular de las bacterias y los eucariotas. Para el descubrimiento de las arqueas fue necesario el desarrollo de técnicas moleculares, ya que las arqueas y las bacterias son aparentemente similares bajo el microscopio de luz. Las diferencias químicas reveladoras que hoy vemos en las membranas de las células de las arqueas y las bacterias se interpretaron originalmente como meras adaptaciones a supuestos medios extremos. En palabras de Brock:³⁶ “El hecho de que *Sulfolobus* y *Thermoplasma* tengan lípidos similares resulta interesante, pero es casi seguro que su explicación se encuentre en la evolución convergente. Esta hipótesis se fortalece por el hecho de que *Halobacterium*, otro organismo muy distinto, también tiene lípidos que son similares a los de ambos termófilos acidófilicos”. Por lo tanto, no se esperaba en absoluto la existencia de un tercer dominio de la vida. Los biólogos se habían tropezado sin saberlo con una nueva forma de vida microbiana.

Ejemplo final es el descubrimiento del ARN catalítico, que sacudió lo que se conoce como el “dogma central”. El dogma central plantea que el ADN se transcribe como ARNm, que a su vez se traduce en proteínas. Se creía que las proteínas desempeñaban las interesantes funciones catalíticas, estructurales y reguladoras que la vida requiere. Aunque ya desde 1967 Carl Woese había pensado que los nucleótidos podrían catalizar reacciones químicas,³⁷ esta idea no se había considerado seriamente. Simplemente se veía al ARN como el intermediario entre el ADN

³⁶ T. D. Brock, *Thermophilic Microorganisms and Life at High Temperatures*, Springer, 1978, p. 178.

³⁷ C. R. Woese, *The Genetic Code: The Molecular Basis for Genetic Expression*, Harper y Row, Nueva York, 1967, pp. 186-189.

y la proteína. Este paradigma fue sacudido por los descubrimientos inesperados e independientes de Tom Cech³⁸ y Sidney Altman³⁹ que revelaron que el ARN podía catalizar las reacciones químicas. Por este descubrimiento Cech y Altman compartieron el Premio Nobel en 1989. Más recientemente se han descubierto las importantes funciones que el ARN desarrolla en la regulación de la expresión de los genes, lo cual ha motivado todavía otra remodelación del paradigma del dogma central. En resumen, algunos de los trabajos más alabados en la historia de la ciencia han trastornado el paradigma predominante en su época. Sin embargo, seguimos trabajando dentro del marco de los paradigmas porque son muy útiles. Los paradigmas pueden ser trastornados por el surgimiento de nuevas tecnologías que propician nuevos tipos de exploraciones, o por la aceptación de que los resultados de un experimento que no corresponden con un paradigma son tan convincentes que obligan a una revisión del paradigma. Como vimos antes, la exploración del mundo microbiano sigue produciendo nuevos e inesperados descubrimientos. No es irrazonable pensar que este proceso continuará en conjunción con el desarrollo de métodos y herramientas más avanzados para sondear el mundo invisible de la vida microbiana.

CONCLUSIONES

No se puede descartar con base en nuestro saber actual la posibilidad de la existencia en la Tierra de descendientes microbianos de formas de vida con un origen alternativo. El hecho de que no los hayamos descubierto no significa que no existan, ya que las herramientas que actualmente usamos para explorar el mundo microbiano no los podrían detectar si existieran. Además, los argumentos que insisten en que los microbios alternativos no podrían coexistir con la vida conocida se pueden desmentir por lo que sabemos acerca de la complejidad y la diversidad de las comunidades microbianas. Si tales microbios existen, sin duda arrojan en la biosfera por nosotros conocida sombras químicas y físicas (por así decirlo) que aún no han sido identificadas y que podrían ser detectadas con las herramientas adecuadas. El reto consiste en desarrollar los métodos para identificar estos elusivos rastros químicos y físicos. No obstante, aun si los microbios sombra no existen hoy en la Tierra, el desarrollo de tales herramientas significa-

³⁸ K. Kruger *et al.*, "Self-splicing RNA: Autoexcision and Autocyclization of the Ribosomal RNA Intervening Sequence of Tetrahymena", *Cell*, 31: 147-157, 1982.

³⁹ C. Guerrier-Takada *et al.*, "The RNA Moiety of Ribonuclease P is the Catalytic Subunit of the Enzyme", *Cell*, 35: 849-857, 1983.

ría una contribución invaluable a la búsqueda en otros planetas y lunas de formas de vida microbiana desconocidas.

El descubrimiento de una “biosfera sombra” terráquea tendría profundas consecuencias científicas y filosóficas. Es evidente que la vida como la conocemos en la Tierra tiene un origen común, lo que significa que actualmente estamos limitados a tan sólo una muestra de la vida. No se puede generalizar a partir de una sola muestra. A fin de formular una teoría realmente general de los sistemas vivientes, necesitamos ejemplos de formas de vida desconocidas. Aunque teóricamente tenemos buenas razones para creer que la arquitectura bioquímica y molecular de la vida en la tierra pudo haber sido por lo menos ligeramente diferente, no podemos saber hasta qué punto lo pudo ser. Es importante que no restrinjamos nuestra reflexión sobre el origen de la vida en la Tierra y sobre la posibilidad de la existencia de la vida extraterrestre con base en un ejemplo de vida limitado y posiblemente muy desorientador. Una búsqueda perseverante de microbios sombra podría tener resultados sorprendentes, revelándonos formas de vida microscópica inesperadamente nuevas. Dado que no se puede descartar la posibilidad de la existencia de formas de vida alternativas en la Tierra, y en vista de la profunda importancia que tal descubrimiento tendría, creemos que esta pesquisa debería considerarse seriamente.

Encontrar una forma de vida alternativa en la Tierra plantea enormes retos técnicos. Primero, no podemos predecir el lugar más idóneo para buscar una forma de vida alternativa. Ignorando la biología de tal forma de vida, no podemos predecir si se puede encontrar en ecosistemas ricos con mucha diversidad microbiana o en lugares con condiciones extremas donde sólo prosperan unos cuantos tipos de microbios conocidos. De hecho, con frecuencia nos ha sorprendido encontrar microbios conocidos en lugares inesperados; por ejemplo, fue inesperado el descubrimiento de abundantes especies de *Mycobacterium* en una comunidad endolítica de una muestra de roca de silicio muy ácida proveniente del géiser del Norris Basin de Yellowstone,⁴⁰ ya que generalmente se encuentran niveles muy bajos de micobacterias en ese medio ambiente. Segundo, el problema es similar al de encontrar la proverbial aguja en un pajar. Es asombrosa la amplitud de la diversidad microbiana. Un estudio reciente calcula que una muestra de tierra con 2×10^9 células g^{-1} puede contener casi 10^7 especies, y que 99.9% de las especies presentes tienen un nivel de menos de 10^5 células g^{-1} .⁴¹ Incluso identificar

⁴⁰ J. J. Walker, J. R. Spear y N. Pace, *op. cit.*

⁴¹ J. Gans, M. Wolinsky y J. Dunbar, “Computational Improvements Reveal Great Bacterial Diversity and High Metal Toxicity in Soil”, *Science*, 309: 1387-1390, 2005.

una rara eubactenum es muy difícil en estas circunstancias. Finalmente, como dijimos antes, nuestros métodos actuales son inadecuados para detectar formas de vida que no tengan un ADN que contenga las cuatro bases canónicas.

Vale la pena reflexionar sobre cuáles serían los nuevos métodos que nos permitieran identificar y caracterizar una forma de vida alternativa. La investigación de la biología singular de una forma de vida alternativa precisaría de una muestra lo suficientemente grande para el análisis químico de sus macromoléculas constitutivas. Su propagación en un cultivo puro sería la manera óptima de lograrlo. Sin embargo, carecemos de los métodos de selección de alto rendimiento para identificar las condiciones de cultivo que pudieran asegurar la propagación en un cultivo puro de un microbio alternativo obtenido en una muestra ambiental. Por lo tanto, probablemente sería mejor enfocar los trabajos iniciales en la detección *in situ* de las potenciales formas de vida alternativas. Probablemente la manera más conveniente de detectar una forma de vida alternativa sería mediante el desarrollo de reactantes que pudieran distinguir entre el ADN típico y otras sustancias genéticas con otro tipo de espinazo o de bases. Tales reactantes podrían utilizarse para teñir muestras ambientales a fin de buscar células que no se vinculen con el reactante, sin olvidar la posibilidad de que la estructura inusual de una pared celular podría conllevar una inadecuada permeabilización de la célula y la consecuente insuficiencia de tñido. Por ejemplo, los anticuerpos contra el ADN deberían poder distinguir entre el típico ADN y los ácidos nucleicos alternativos que contuvieran un tipo diferente de espinazo; esto se podría poner a prueba fácilmente utilizando análogos sintéticos de ADN. Un método opcional consistiría en desarrollar reactantes que pudieran identificar estructuras de espinazo alternativas. Aunque la creación de tales reactantes es ciertamente factible, este método sería una especie de expedición de pesca, restringida por nuestra incapacidad para predecir qué tipo de espinazos podrían encontrarse en las formas de vida alternativas. No obstante, una ventaja de este método sería que una sonda fluorescente que no tiñera las células normales pudiera servir para recolectar células teñidas, utilizando un clasificador celular activado por fluorescencia (FACS, fluorescence-activated cell sorting).

Sería necesaria una metodología diferente para detectar formas de vida alternativas que utilizaran una serie diferente de bases en el ADN. Se podrían utilizar anticuerpos que identificaran tanto las bases como el espinazo del ADN. También podrían desarrollarse anticuerpos que identificaran las bases alternativas en un contexto de ADN y se utilizaran para teñir muestras ambientales con el fin de buscar células que tuvieran bases diferentes en el ADN. Se podrían utilizar las sondas

fluorescentes para seleccionar las células que se vincularan con la sonda y someterlas a más análisis. Alternativamente, los anticuerpos contra el ADN que contuviera bases no estándar podrían inmovilizarse y utilizarse para capturar, en el volumen de ADN extraído de las muestras ambientales, el ADN que contuviera bases inusuales, posiblemente en cantidades suficientes para la caracterización química. Todos los métodos propuestos suponen retos técnicos, particularmente el tremendo problema de detectar un microbio raro en una población grande y diversa. No obstante, debe considerarse la realización de una búsqueda disciplinada de los microbios sombra en la Tierra, puesto que encontrar una forma de vida alternativa sería uno de los más grandes descubrimientos científicos de todos los tiempos.

BIBLIOGRAFÍA

- Anders, E., "Prebiotic Organic Matter from Comets and Asteroids", *Nature*, 342: 255-257, 1989.
- Andersen, A. C., y H. Haack, "Carbonaceous Chondrites: Tracers of the Prebiotic Chemical Evolution of the Solar System", *International Journal of Astrobiology*, 4: 12-17, 2005.
- Benner, S. A., "Expanding the Genetic Lexicon: Incorporating Non-Standard Amino Acids into Proteins by Ribosome-Based Synthesis", *Trends in Biotechnology*, 12: 158-163, 1994.
- , "Understanding Nucleic Acids Using Synthetic Chemistry", *Accounts of Chemical Research*, 37: 784-797, 2004.
- Benner, S. A., y D. Hutter, "Phosphates, DNA, and the Search for Nonterrean Life: A Second Generation Model for Genetic Molecules", *Bioorganic Chemistry*, 30: 62-80, 2002.
- Benner, S. A., A. Ricardo y M. A. Carrigan, "Is There a Common Chemical Model for Life in the Universe?", *Current Opinion in Chemical Biology*, 8: 672-689, 2004.
- Benner, S. A., y C. Y. Switzer, "Chance and Necessity in Biomolecular Chemistry: Is Life as We Know It Universal?", en H. Frauenfelder, J. Deisenhofer y P. J. Wolynes (comps.), *Simplicity and Complexity in Proteins and Nucleic Acids*, Dahlem University Press, Berlín, 1999, pp. 339-363.
- Botta, O., y J. Bada, "Extraterrestrial Organic Compounds in Meteorites", *Surveys in Geophysics*, 23: 411-467, 2002.
- Brock, T. D., *Thermophilic Microorganisms and Life at High Temperatures*, Springer, Nueva York, 1978, p. 178.

- Cairns-Smith, A. G., A. J. Hall y M. J. Russel, "Mineral Theories of the Origin of Life and an Iron-Sulfide Example", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 22: 161-180, 1992.
- Canne, L. E., G. M. Figliozi, B. Robson, M. A. Siani, D. A. Thompson, C. Koike, J. A. Train-er, S. B. H. Kent y R. J. Simon, "The Total Chemical Synthesis of L-and D-Superoxide Dismutase", *Protein Engineering*, 10: 23, 1997.
- Chyba, C. F., P. J. Thomas, L. Brookshaw y C. Sagan, "Cometary Delivery of Organic Mol-ecules to the Early Earth", *Science*, 249: 366-373, 1990.
- Cody, G., "Transition Metal Sulfides and the Origin of Metabolism", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 32: 569-599, 2004.
- Copley, S. D., E. Smith y H. J. Morowitz, "A Mechanism for the Association of Amino Acids and their Codons with the Origin of the Genetic Code", *Proceedings of the Na-tional Academy of Sciences*, 102: 4442-4447, 2005.
- Davies, P. C., y C. H. Lineweaver, "Finding a Second Sample of Life on Earth", *Astrobiolo-gy*, 5 (2): 154-163, 2005.
- Dobson, C. M., G. B. Ellison, A. F. Tuck y V. Vaida, "Atmospheric Aerosols as Prebiotic Chemical Reactors", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97: 11864-11868, 2000.
- Eschenmoser, A., "Chemical Etiology of Nucleic Acid Structure", *Science*, 284: 2118-2123, 1999.
- Fitzgerald, M. C., I. Chernushevic, K. G. Standing, S. B. H. Kent y C. P. Whitman, "Total Chemical Synthesis and Catalytic Properties of the Enzyme Enantiomers L- and D-4-Oxalocrotonate Tautomerase", *Journal of the American Chemical Society*, 117: 11075-11080, 1995.
- Fry, I., *The Emergence of Life on Earth: A Historical and Scientific Overview*, Rutgers Uni-versity Press, Londres, 2000.
- Gans, J., M. Wolinsky y J. Dunbar, "Computational Improvements Reveal Great Bacterial Diversity and High Metal Toxicity in Soil", *Science*, 309: 1387-1390, 2005.
- Geyer, C. R., T. R. Battersby y S. A. Benner, "Nucleobase Pairing in Expanded Watson-Crick-like Genetic Information Systems", *Structure*, 11: 1485-1498, 2003.
- Gilbert, W., "Origin of Life: The RNA World", *Nature*, 319: 618, 1986.
- Glavin, D. P., J. L. Bada, K. L. Brington y G. D. McDonald, "Aminoacids in the Martian Me-teorite Nakhla", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 96: 8835-8838, 1999.
- Guerrier-Takada, C., K. Gardiner, T. Maesh, N. Pace y S. Altman, "The RNA Moiety of Ri-bonuclease P is the Catalytic Subunit of the Enzyme", *Cell*, 35: 849-857, 1983.
- Holm, N. G., y E. M. Anderson, "Hydrothermal Systems", en A. Brack (comp.), *The Molec-ular Origins of Life: Assembling Pieces of the Puzzle*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998, pp. 86-99.

- Huang, Z., K. C. Schneider y S. A. Benner, "Oligonucleotide Analogs with Dimethyl-Sulfide, -Sulfoxide and -Sulfone Groups Replacing Phosphodiester Linkages", en S. Agrawal (comp.), *Methods in Molecular Biology*, Rowman & Littlefield, 1993, pp. 315-353.
- Joyce, G., "The Antiquity of RNA-Based Evolution", *Nature*, 418: 214-221, 2002.
- Kruger, K., P. J. Grabowski, A. J. Zang, J. Sands, D. E. Gottschling, T. R. Cech, "Self-splicing RNA: Autoexcision and Autocyclization of the Ribosomal RNA Intervening Sequence of Tetrahymena", *Cell*, 31: 147-157, 1982.
- Kuhn, T. S., *The Structure of Scientific Revolutions*, The University of Chicago Press, Chicago, 1979. [Versión en español: *La estructura de las revoluciones científicas*, trad. de Carlos Solís Santos, 4ª ed., Fondo de Cultura Económica, México, 2012.]
- Leadbetter, J. R., "Cultivation of Recalcitrant Microbes: Cells are Alive, Well, and Revealing their Secrets in the 21st Century Laboratory", *Current Opinion in Microbiology*, 6: 276-281, 2003.
- Madigan, M. T., y J. M. Martinko, *Brock Biology of Microorganism*, Pearson Prentice-Hall, Upper Saddle River, 2006. [Versión en español: *Brock. Biología de los microorganismos*, Pearson/Prentice-Hall, Madrid, 2009.]
- Martin, W., y M. Russell, "On the Origin of Cells: A Hypothesis for the Evolutionary Transitions from Abiotic Geochemistry to Chemoautotrophic Prokaryotes, and from Prokaryotes to Nucleated Cells", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 358: 59-85, 2003.
- McCaig, A. E., L. A. Glover y J. I. Prosser, "Molecular Analysis of Bacterial Community Structure and Diversity in Unimproved Upland Grass Pastures", *Applied Environmental Microbiology*, 65: 1721-1730, 1999.
- Miller, P. S., K. B. McParland, J. Jayaraman y P. O. P. Tso, "Biochemical and Biological Effects of Nonionic Nucleic Acid Methylphosphonates", *Biochemistry*, 20: 1874-1880, 1981.
- Milton, R. C. L., S. C. F. Milton y S. B. H. Kent, "Total Chemical Synthesis of a D-Enzyme: The Enantiomers of HIV-1 Protease Show Demonstration of Reciprocal Chiral Substrate Specificity", *Science*, 245: 1445-1448, 1992.
- Oparin, A. I., *The Origin of Life on Earth*, Oliver y Boyd, Edimburgo, 1957. [Versión en español: *El origen de la vida*, trad. de D. Orozco, Grijalbo, México, 1968.]
- Oró, J., D. A. Flory, J. M. Gilbert, J. McReynolds, H. A. Lichtenstein y S. Wikstrom, "Abundances and Distribution of Organogenic Elements and Compounds in Apollo 12 Lunar Samples", *Proceedings of Second Lunar Science Conference*, 2: 1913-1925, 1971.
- Pace, N. R., "A Molecular View of Microbial Diversity and the Biosphere", *Science*, 274: 734-740, 1997.
- Piccirilli, J. A., T. Krauch, E. E. Moroney y S. A. Benner, "Extending the Genetic Alpha-

- bet: Enzymatic Incorporation of a New Base Pair into DNA and RNA", *Nature*, 343: 33-37, 1990.
- Prusiner, S. B., "Prions", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95: 13363-13383, 1998.
- Reddy, P. M., y T. C. Bruice, "Solid-phase Synthesis of Positively Charged Deoxynucleic Guanidine (DNG) Oligonucleotide Mixed Sequences", *Bioorganic and Medicinal Chemistry Letters*, 13: 1281-1285, 2003.
- Reid, R., *Microbes and Men*, British Broadcasting Corporation, Londres, 1974.
- Richert, C., A. L. Roughton y S. A. Benner, "Nonionic Analogs of RNA with Dimethylene Sulfone Bridges", *Journal of the American Chemical Society*, 118: 4518-4531, 1996.
- Rothschild, L. J., y R. L. Mancinelli, "Life in Extreme Environments", *Nature*, 409: 1092-1101, 2001.
- Shapiro, R., *Origins: A Skeptic's Guide to the Creation of Life on Earth*, Bantam Books, Nueva York, 1986. [Versión en español: *Orígenes: lo que sabemos actualmente sobre el origen de la vida*, trad. de M. Crespo, Salvat, Barcelona, 1987.]
- Sleep, N. H., K. J. Zahnle, J. F. Kastings y H. J. Morowitz, "Annihilation of Ecosystems by Large Asteroid Impacts on the Early Earth", *Nature*, 342: 139-142, 1989.
- Spear, J. R., J. J. Walker, T. M. McCollum y N. R. Pace, "Hydrogen and Bioenergetics in the Yellowstone Geothermal Ecosystem", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102: 2555-2560, 2005.
- Wächtershäuser, G., "Groundworks for an Evolutionary Biochemistry: The Iron-Sulphur World", *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 58: 85-201, 1992.
- , "Before Enzymes and Templates: Theory of Surface Metabolism", *Microbiological Review*, 52: 452-484, 1988.
- Walker, J. J., J. R. Spear y N. Pace, "Geobiology of a Microbial Endolithic Community in the Yellowstone Geothermal Environment", *Nature*, 434: 1011-1014, 2005.
- Ward, P. D., y D. Brownlee, *Rare Earth*, Springer, Nueva York, 2000.
- Woese, C. R., *The Genetic Code: The Molecular Basis for Genetic Expression*, Harper & Row, Nueva York, 1967.
- , "The Archaeal Concept and the World it Lives In: A Retrospective", *Photosynthesis Research*, 80: 361-371, 2004.
- Woese, C. R., O. Kandler y M. L. Wheelies, "Towards a Natural System of Organisms: Proposal for the Domains Archaea, Bacteria and Eucarya", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87: 4576-4579, 1998.
- Yoshimura, T., y N. Esaki, "Amino Acid Racemases: Functions and Mechanisms", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 96: 103-109, 2003.
- Zawadzke, L. E., y J. M. Berg, "A Racemic Potein", *Journal of the American Chemical Society*, 114: 4002-4003, 1992.

National Research Council of the National Academies*

XV. INTRODUCCIÓN A LOS LÍMITES DE LA VIDA ORGÁNICA EN LOS SISTEMAS PLANETARIOS**

LA BÚSQUEDA DE LA VIDA EN EL COSMOS

La Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (National Aeronautics and Space Administration, NASA) desde hace mucho tiempo ha dado alta prioridad a las misiones que indagan si la vida extraterrestre pudiera existir en el Sistema Solar y más allá de éste. Tal prioridad refleja el interés público, el cual aumentó a mediados de los noventa cuando se comprobó que algunos fragmentos de Marte que llegaron a la Tierra como meteoritos contenían pequeñas estructuras semejantes a la vida microbiana.

La adecuada interpretación de estas estructuras sigue siendo controvertida, pero indudablemente nada alteraría más nuestra idea de la humanidad y de nuestra posición en el cosmos que el descubrimiento de vida alienígena. Nada podría contribuir más a la meta de la NASA de explorar el cosmos, o a inspirar y educar a la próxima generación de estudiantes de las ciencias principales y de la ingenie-

* Consejo Nacional de Investigaciones de las Academias Nacionales de los Estados Unidos.

** Este capítulo apareció originalmente en National Academy of Sciences, *The Limits of Organic Life in Planetary Systems*, National Academies Press, Washington, 2007, pp. 5-10. © 2007, National Academy of Sciences, cortesía de la National Academies Press, Washington. Este trabajo se realizó con los esfuerzos combinados del Committee on the Limits of Organic Life in Planetary Systems, del Space Studies Board y del Board on Life Sciences. El texto completo se encuentra disponible en <<http://www.nap.edu/catalog/11919.html>>. Los miembros del Committee on the Limits of Organic Life in Planetary Systems son: John A. Baross (presidente), Steven A. Benner, George D. Cody, Shelley D. Copley, Norman R. Pace, James H. Scott, Robert Shapiro, Mitchell L. Sogin, Jeffrey L. Stein, Roger Summons y Jack W. Szostak. Los miembros del Space Studies Board son: Lennard A. Fisk (presidente), A. Thomas Young (vicepresidente), Spyro K. Antiochos, Daniel N. Baker, Steven J. Battel, Charles L. Bennett, Judith A. Curry, Jack D. Farmer, Jack D. Fellows, Jacqueline N. Hewitt, Tamara E. Jernigan, Klaus Keil, Berrien Moore III, Kenneth H. Nealson, Norman P. Neureiter, Suzanne Oparil, James Pawelczyc, Harvey D. Tannanbaum, Richard H. Truly, Joseph F. Veverka, Warren M. Washington, Gary P. Zank y Marcia S. Smith. Los miembros del Board on Life Sciences son: Keith Yamamoto (presidente), Ann M. Arvin, Jeffrey L. Bennetzen, Ruth Berkelman, Deborah Blum, R. Alta Charo, Jeffrey L. Dangl, Paul R. Ehrlich, Mark D. Fitzsimmons, Jo Handelsman, Ed Garlow, Kenneth H. Keller, Randall Murch, Gregory A. Petsko, Muriel E. Poston, James Reichman, Marc T. Tessier-Lavigne, James Tiedje, Terry L. Yates, y Frances Sharples.

ría, que una búsqueda de la vida alienígena. Nada podría ser más infortunado que invertir considerables recursos en la búsqueda de la vida alienígena para no poder identificarla si se encontrara.

La búsqueda de la vida en el cosmos empieza con nuestra comprensión de la vida en la Tierra. Este conocimiento ha crecido enormemente a lo largo del pasado siglo. Aunque la vida terráquea se categoriza convenientemente en millones de especies, hoy los estudios de la estructura molecular de la biosfera demuestran claramente que todos los organismos que se han examinado tienen un ancestro común. No hay razón alguna para creer, o incluso sospechar, que la vida surgiera en la Tierra más de una sola vez o que tuviera estructuras biomoleculares que fueran muy diferentes de las que posee la vida terráquea conocida.

Nuestro único ejemplo de la vida ha tenido bastante éxito en la dominación del planeta. La Tierra contiene múltiples medios, algunos extremos según los estándares humanos. Una enseñanza derivada de las investigaciones de la bioquímica terráquea y su rango ambiental en la Tierra, es que la vida conocida requiere agua líquida. Dondequiera que se encuentre una fuente de energía en la Tierra con agua líquida, la vida de tipo estándar existe.

Este dato ya ha ayudado a guiar a las misiones de la NASA mediante la directiva de “seguir la pista del agua” en la búsqueda de la vida en el Sistema Solar. Los medios donde el agua líquida pudiera encontrarse o pudiera haber existido encabezan la lista de los sitios planificados para las misiones de la NASA. Cuando se descubren lugares cuya geología indica casi sin lugar a dudas la presencia en el pasado de agua líquida en abundancia, el interés de los científicos se aviva.

A pesar del carácter pragmático de la estrategia, los científicos y también la gente lego se han preguntado si no es una estrategia provincial, o “terricentrista”. Como señaló Carl Sagan, no es sorprendente que unos organismos basados en el carbono que respiran aire y se componen de 60% de agua hayan llegado a la conclusión de que la vida debe basarse en el carbono y en el agua y debe metabolizar el oxígeno ambiental.¹

La profundidad y la amplitud de nuestro conocimiento de la química terráquea nos incitan a enfocar el carbono porque la vida terráquea se basa en el carbono, y la química orgánica como la conocemos tuvo su origen en la química de los productos naturales del siglo XIX, la cual se basaba en el aislamiento de los compuestos provenientes de la naturaleza. Si la vida terráquea le hubiera propor-

¹ C. Sagan, “Extraterrestrial Life”, en C. Sagan (comp.), *Communication with Extraterrestrial Intelligence (CETI)*, MIT Press, Cambridge, 1973, pp. 42-67.

cionado moléculas basadas en el silicio, entonces nuestro conocimiento de la química basada en el silicio estaría hoy muy avanzado.

La tendencia natural al “terracentrismo” requiere que nos esforcemos en ampliar nuestras ideas sobre los lugares donde la existencia de la vida es posible y sobre las formas que ésta pudiera asumir. Además, los principios básicos de la química nos previenen contra el terracentrismo. Es fácil imaginar reacciones químicas que pudieran sustentar la vida basadas en compuestos no carbónicos con un solvente que no fuera el agua, o basadas en reacciones de oxidación-reducción sin dioxígeno. Además, hay reacciones que no son redox. Por ejemplo, la vida podría obtener energía de $\text{NaOH} + \text{HCl}$; la reacción es abióticamente rápida, pero un organismo podría introducir filamentos en el ácido y la base y vivir del gradiente. Un organismo podría obtener energía de una solución supersaturada. Podría obtener humedad relativa del vapor de agua. Es fácil imaginar la vida alienígena en medios muy distintos de la superficie de un planeta rocoso. La gente se ha enterado de estas ideas gracias a la ciencia ficción y a las divulgaciones científicas populares, como el libro de Peter Ward, *Life as We Do Not Know It*.²

Entre la gente en general y entre la comunidad científica se ha despertado el interés en perspectivas serias sobre la posible existencia de la vida en hábitats del Sistema Solar muy diferentes de los que sustentan la vida en la Tierra, y de la existencia de un tipo de vida que se sustente por “extraños” procesos químicos con solventes desconocidos y por un metabolismo exótico. Estas nociones podrían ayudar a guiar a las misiones de la NASA a través del Sistema Solar y podrían permitirles identificar a la vida alienígena si la encontraran, sea cual fuere su estructura. Dada la inevitabilidad de las misiones con tripulaciones humanas a Marte y otros lugares potencialmente habitados por vida alienígena, la comprensión de la amplitud de la vida ayudará a los investigadores a estudiar ese tipo de vida antes que la presencia humana la contamine o, por ignorancia o pasividad, la destruya.

Grosso modo este resumen muestra que el comité no ha encontrado razones convincentes para determinar que la vida debe necesariamente utilizar el agua como solvente, incluso si sólo puede usar el carbono como elemento estructural en el ensamblaje de la mayoría de sus biomoléculas. Son concebibles en el agua diversas estructuras moleculares que podrían (en principio) sustentar la vida, pero ésta sería lo suficientemente distinta de la vida terráquea como para eludir su identificación por unas herramientas poco sofisticadas de detección de la vida.

² P. Ward, *Life as We Do Not Know It*, Viking, Nueva York, 2005.

Las evidencias sugieren que los procesos darwinianos sustentados por biopolímeros orgánicos (como el ADN), requieren agua o un solvente como el agua. Finalmente, aunque se conocen macromoléculas que utilizan el silicio, no se ha explicado bien cómo podrían emerger espontáneamente para mantener una biosfera.

DEFINICIÓN DE LA AMPLITUD DEL PROBLEMA

Desde hace muchas generaciones la definición de la vida ha eludido los esfuerzos de científicos y filósofos. (Muchos han llegado a reconocer que es difícil definir el concepto mismo de “definición”).³ Sin embargo, podemos listar las características del único ejemplo de la vida que conocemos: la vida en la Tierra.

- La vida es esencialmente química; los sistemas vivientes terráqueos contienen especies moleculares que experimentan transformaciones químicas (metabolismo) dirigidas por moléculas (catalizadores enzimáticos) que heredan su estructura molecular y que portan la información hereditaria misma.
- Los sistemas vivientes terráqueos explotan el desequilibrio termodinámico a fin de experimentar transformaciones químicas dirigidas.
- Las biomoléculas que la vida terráquea utiliza para sustentar el metabolismo, construir estructuras, controlar la energía y transferir la información aprovechan las propiedades de los enlaces covalentes del carbono, el hidrógeno, el nitrógeno, el oxígeno, el fósforo y el azufre, así como la habilidad de los heteroátomos, principalmente los de oxígeno y de nitrógeno, para modular la reactividad de los hidrocarburos.
- Las biomoléculas terráqueas interactúan con el agua a fin de ser solubles (o no) y de reaccionar (o no) de un modo que confiera adecuación al organismo que las alberga. Las biomoléculas de la vida terráquea al parecer poseen una estructura molecular que crea propiedades que se adecuan específicamente a las exigencias impuestas por el agua.
- Los sistemas vivientes que han emergido en la Tierra lo han hecho mediante un proceso de variación aleatoria en la estructura de las biomoléculas heredadas, proceso al que se sobrepuso la selección natural a fin de alcanzar adecuación. Estos son los elementos centrales del paradigma darwiniano.

³ C. E. Cleland y C. F. Chyba, “Defining ‘Life’”, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 32: 382-393, 2002.

Es comprensible que se hayan incorporado estas características en varias de las definiciones de la vida publicadas, dado que nosotros somos la forma de vida que define la vida. Ya que todas las estructuras químicas de los sistemas biomoleculares terráqueos al parecer han surgido mediante procesos darwinianos, ciertamente no sorprende en absoluto que algunas de las definiciones de la vida más serias sostengan que la vida es “un sistema químico capaz de experimentar la evolución darwiniana”.⁴

¿ES LA EVOLUCIÓN UN ASPECTO ESENCIAL DE LA VIDA?

Muchas de las definiciones de la vida incorporan frases como *experimenta la evolución darwiniana*. Esto implica que los cambios fenotípicos y la adaptación son necesarios para explotar las condiciones ambientales inestables y funcionar óptimamente en el medio ambiente. Se ha sugerido la existencia de cambios evolutivos en la hipotética “vida de arcilla cristalina” de Cairns-Smith,⁵ en relación con los errores aleatorios que ocurren en la estructura cristalina como sucesos análogos a las mutaciones. ¿Podría considerarse viviente un sistema químico autorreplicador capaz de experimentar transformaciones químicas en el medio ambiente? Si los compuestos químicos autorreplicadores no son formas de vida, la replicación por sí sola no basta para ser considerada como una característica definitoria de la vida. Asimismo, la capacidad de experimentar la evolución darwiniana, un proceso que resulta en cambios hereditarios en una población, tampoco basta para definir la vida si consideramos que la capacidad de los minerales para reproducir los errores de su estructura cristalina es equivalente a la evolución. Aunque esa propiedad de las arcillas pudo haber sido vital en el origen de la vida y particularmente en la síntesis prebiótica de las macromoléculas orgánicas, y aunque las arcillas pudieron haber sido catalizadoras de las reacciones metabólicas, ¿puede la perpetuación de los “errores” de una estructura cristalina dar por resultado la selección de una estructura cristalina “más apta”? Es importante subrayar que la evolución no es simplemente la reproducción de mutaciones (errores en las arcillas), sino la selección de variantes que sean funcionalmente más aptas.

⁴ G. F. Joyce *et al.*, “Forward”, en D. W. Deamer y G. R. Fleischaker (comps.), *Origins of Life: The Central Concepts*, Jones & Bartlett, Boston, 1994.

⁵ A. G. Cairns-Smith, *Genetic Takeover and the Mineral Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1982.

Las características canónicas de la vida conllevan la capacidad inherente de la adaptación a las condiciones ambientales cambiantes y la interacción con otros organismos vivos (y, por lo menos en la Tierra, también con los virus).⁶ La selección natural es la clave de la evolución y la razón principal de que la evolución darwiniana siga siendo una característica de muchas definiciones de la vida. La única alternativa a la evolución para la producción de la diversidad sería que hubiera condiciones ambientales que continuamente crearan formas de vida diferentes o formas de vida similares que sufrieran “errores” frecuentes y aleatorios en la síntesis de los patrones químicos utilizados en la replicación o el metabolismo. Tales errores serían equivalentes a mutaciones y podrían resultar en rasgos que le dieran una ventaja selectiva a una comunidad existente o a la explotación de nuevos hábitats. Ese proceso aleatorio podría resultar en formas de vida que experimentarían una especie de evolución sin poseer una macromolécula clave de información, tal como el ADN o el ARN. Es difícil pensar que tales formas de vida pudieran “evolucionar” hasta ser estructuras complejas, a menos que dispusieran de otros mecanismos como la simbiosis o la fusión célula-célula.

La evolución es el mecanismo clave de los cambios hereditarios en una población. No obstante, aunque la mutación y la selección natural son procesos importantes, no son los únicos mecanismos para adquirir nuevos genes. Se sabe que la transferencia lateral de genes es uno de los más importantes y uno de los más primitivos mecanismos para crear la diversidad y posiblemente para generar genomas con la información necesaria para llegar a ser células de vida independiente.⁷ La transferencia lateral de genes también es uno de los mecanismos para alinear genes de diferentes fuentes en actividades funcionales complejas, tales como la magnetotaxis y la reducción desasimilatoria del sulfato.⁸ Es posible que este mecanismo fuera importante en la evolución de vías metabólicas y biosintéticas y de otros rasgos fisiológicos que acaso evolucionaron tan sólo una vez, aunque existan en una amplia variedad de organismos. La coevolución de dos o más

⁶ J. R. Brown, “Ancient Horizontal Gene Transfer”, *Nature Reviews Genetics*, 4: 121-132, 2003; W. Martin *et al.*, “Early Cell Evolution, Eukaryotes, Anoxia, Sulfide, Oxygen, Fungi First (?), and a Tree of Genomes Revisited”, *IUBMB Life*, 55: 193-204, 2003; H. Ochman, J. G. Lawrence y E. S. Groisman, “Lateral Gene Transfer and the Nature of Bacterial Innovation”, *Nature*, 405: 299-304, 2000; C. R. Woese, “On the Evolution of Cells”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99: 8742-8747, 2002.

⁷ W. Martin *et al.*, *op. cit.*

⁸ K. Grünberg *et al.*, “A Large Gene Cluster Encoding Several Magnetotactic Bacteria”, *Applied Environmental Microbiology*, 67: 4573-4582, 2001; M. Musmann *et al.*, “Clustered Genes Related to Sulfate Respiration in Uncultured Prokaryotes Support the Theory of their Concomitant Horizontal Transfer”, *Journal of Bacteriology*, 182: 7126-7127, 2005; D. Mazel, “Intregons: Agents of Bacterial Evolution”, *Nature Review of Microbiology*, 4: 608-620, 2006.

especies es también un sello distintivo de la evolución que se manifiesta de muchas maneras, desde las interacciones de los insectos y las plantas hasta la participación de cientos de especies de bacterias en la nutrición de los rumiantes. Los organismos y el medio ambiente también coevolucionan, dependiendo de las características dominantes del medio ambiente y de la disponibilidad del carbono y de las fuentes de energía.

Si la habilidad para experimentar la evolución darwiniana es un rasgo canónico de la vida, a pesar de lo diferente que pueda ser una forma de vida de la vida terráquea, ¿existen propiedades en los organismos extraterrestres sujetos a la evolución que pudieran ser detectables como signos positivos de vida? La evolución les proporciona a los organismos la oportunidad de explotar medios nuevos y cambiantes, y una evidencia de la ubicuidad cósmica de la evolución es que en la Tierra la vida ocupa todos los hábitats disponibles e incluso los crea como consecuencia de su metabolismo. Otro sello distintivo de la evolución es la habilidad de los organismos para coevolucionar con otros organismos y formar asociaciones permanentes y obligatorias. Es muy probable que una inevitable consecuencia de la evolución haya sido la eliminación de linajes bioquímicos de vida radicalmente diferentes que pudieran haberse formado durante el periodo más primitivo de la evolución de la vida. La vida existente en la Tierra es el resultado de la selección del linaje más apto, o de la homogeneización de algunos o todos los linajes diferentes en una comunidad ancestral común que se desarrolló en la forma de los tres linajes (dominios) principales de la actualidad. Los tres poseen una bioquímica común basada presumiblemente en las estrategias informativas más “aptas” y en las vías de captación de energía que se eligieron entre un popurrí de posibilidades.

Por ende, una de las generalizaciones que al parecer se puede hacer con base en la vida existente en la Tierra, así como una posible explicación del desarrollo de la “unidad bioquímica” en todos los organismos, es que la transferencia lateral de los genes es un antiguo y eficaz mecanismo para la rápida creación de la diversidad y la complejidad. La transferencia lateral de los genes es también un mecanismo eficiente para la selección de los genes más “aptos” para proteínas específicas y para su transferencia a diversos grupos de organismos. Los resultados son la suma de genes y la sustitución de los genes menos aptos por genes que tienen funciones similares. La selección natural basada únicamente en la mutación probablemente no sea un mecanismo adecuado para la evolución de la complejidad. Más importante todavía, la transferencia lateral de los genes y la endosimbiosis probablemente fueron los mecanismos más obvios para la creación de genomas

complejos que pudieran generar células y comunidades celulares complejas independientes durante el breve periodo geológico entre el origen de la vida y el establecimiento de la fijación autotrófica del CO₂ hace 3800 millones de años, y la reducción del sulfato microbiana hace 3470 millones de años, con base en datos isotópicos.⁹ Una importante consecuencia de la existencia de los virus o entes parecidos a los virus durante la evolución primigenia de los organismos celulares es que sus genomas pudieron haber sido la fuente de la mayoría de las innovaciones genéticas por causa de su rápida replicación, de los altos índices de mutaciones por los errores en la replicación, y de las inserciones de genes provenientes de diversas células huésped.¹⁰

¿Es la evolución un aspecto esencial de la vida? Las células son más que la información codificada en sus genomas; son parte del muy complejo sistema biológico y geoquímico integral en cuya creación y mantenimiento participaron. La similitud de la bioquímica en todos los organismos de la Tierra enfatiza la habilidad de los organismos para interactuar con otros organismos a fin de formar comunidades coevolutivas, para adquirir y transmitir nuevos genes, para utilizar de otro modo los viejos genes, para explotar nuevos hábitats y, lo que es más importante, para desarrollar mecanismos que los ayuden a controlar su propia evolución. Estas características probablemente existirían en la vida extraterrestre, incluso si ésta tuviera un origen distinto y una bioquímica diferente a la de la vida en la Tierra.

BREVES CONSIDERACIONES EN TORNO A LAS POSIBLES FORMAS DE VIDA NO INCLUIDAS EN ESTE INFORME

Tal como se expone en la bibliografía (véase Ricardo y Carrigan),¹¹ los modelos químicos de la vida no terráquea revelan lo que la comunidad científica considera posible, particularmente en relación con las diversas formas en que los siste-

⁹ M. T. Rosing, "¹³C-Depletes Carbon Microparticles in >3700-Ma Sea-Floor Sedimentary Rocks From West Greenland", *Science*, 283: 674-676, 1999; Y. Shen, R. Buick y D. E. Canfield, "Isotopic Evidence for Microbial Sulfate Reduction in the Early Archaean Era", *Nature*, 470: 77-81, 2001; M. A. Shidlowksi, "A 3800-Million-Year Isotopic Record of Life from Carbon in Sedimentary Rocks", *Nature*, 333: 313-318, 1988.

¹⁰ J. M. Claverie, "Viruses Take Center Stage in Celular Evolution", *Genome Biology*, 7: 110, 2006; P. Forterre, "Three RNA Cells for Ribosomal Lineages and Three DNA Viruses to Replicate their Genomes: A Hypothesis for the Origin of Cellular Domain", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103: 3669-3674, 2006; E. V. Koonin y W. Martin, "On the Origin of Genomes and Cells within Inorganic Compartments", *Trends in Genetics*, 21: 647-654, 2005.

¹¹ A. Ricardo y M. A. Carrigan, "Is There a Common Chemical Model for Life in the Universe?", *Current Opinion in Chemical Biology*, 8: 672-689, 2004.

mas organizan la materia y la energía para generar la vida. Así, la vida realmente “extraña” podría utilizar en su ensamblaje un elemento que no fuera el carbono. Menos extraña, aunque aún rara en la experiencia biológica humana, sería una forma de vida que no explotara los desequilibrios termodinámicos que son principalmente químicos. Más extraña sería una forma de vida que no explotara el agua como medio líquido. Más extraña todavía sería una forma de vida que existiera en la fase sólida o gaseosa.¹² En un nivel diferente, pero también fuera del ámbito de la vida que la mayoría de las comunidades científicas considera posible, sería una forma de vida que no tuviera una historia evolutiva darwiniana.

Sin embargo, es casi seguro que algunos rasgos de la vida terráquea sean universales. En particular, la necesidad del desequilibrio termodinámico está tan arraigada en nuestra comprensión de la física y la química que no es cuestionable como requisito de la vida. Otros criterios no son absolutos. La biología terráquea contiene claros ejemplos del uso de la energía no química; el más conocido es el de la fotosíntesis, aunque la energía de la luz pronto se convierta en energía química. Es concebible que el silicio pueda sustentar el ensamblaje de moléculas grandes en ciertos medios. Este informe explícitamente considera los medios no acuosos.

Incluso la evolución darwiniana posiblemente no es un factor absoluto. Por ejemplo, dependiendo de cómo la civilización humana aplique la terapia genética, nuestra particular forma de vida podría evolucionar mediante procesos lamarckianos,¹³ en vez de darwinianos. La humanidad sería capaz de identificar y solucionar ciertos problemas de la biología humana sin tener la necesidad de elegir entre diversos sucesos aleatorios, de esta manera ahorrándole a la especie la necesidad de eliminar los inevitables defectos genéticos mediante la muerte de los individuos. La biosfera humana no sería menos viviente por esto, incluso para quienes la evolución darwiniana es el meollo de su concepto de la vida.

Asimismo, podemos imaginar fácilmente la existencia de robots que se autorreproducen o de procesos basados en la computación que pueden crecer y replicarse.¹⁴ Aquí, la transferencia de información no se basaría en una replicación

¹² L. J. Allamandola y D. M. Hudgins, “From Interstellar Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Ice to Astrobiology”, en V. Pirronello y J. Krelowski (comps.), *Proceedings of the NATO ASI, Solid State Astrochemistry*, Kluwer, Dordrecht, 2003, pp. 1-54.

¹³ Lamarck planteó un principio similar al de la evolución, la llamada “herencia de caracteres adquiridos”, afirmando que las variaciones en las características que muestran los organismos fueron adquiridas en respuesta al medio ambiente.

¹⁴ C. Adami y C. O. Wilke, “Experiments in Digital Life”, *Artificial Life*, 10: 117-122, 2004; M. T. Rosing, *op. cit.*; Y. Shen, R. Buick y D. E. Canfield, *op. cit.*; M. A. Shidlowksi, *op. cit.*

molecular específica, sino en una replicación que dependiera de la información contenida en una matriz. Habrá que ver si a estos entes se les calificará o no de vivientes.

Lo que resulta claro es que la comunidad científica no cree que la “vida” lamarkiana, robótica o informática pueda surgir espontáneamente de la materia inanimada. Mínimamente, su matriz tiene que determinarse en el inicio mediante una forma de vida química darwiniana que haya surgido de procesos similares a los que se han dado en la Tierra. Pero hay que repetirlo, no es claro si nuestra incapacidad para ampliar nuestra perspectiva con base en nuestro saber determina estos puntos de vista, o si éstos reflejan las verdaderas constricciones de los procesos mediante los cuales la vida podría emerger naturalmente.

Estas reflexiones introducen un tema subsidiario de este informe. Es concebible que la química, la estructura, o los hábitats que son capaces de *sustentar* la vida no fueran los adecuados para *dar inicio* a la vida. Por ejemplo, la Tierra puede sustentar la vida hoy, pero hay quienes actualmente sostienen que la vida no pudo haberse originado en una atmósfera tan oxidante como la de la Tierra actual. Si resulta cierto, la superficie de la Tierra sería un medio ambiente que es habitable pero que no es capaz de dar origen a la vida.

ESTRATEGIAS PARA MITIGAR EL ANTROPOCENTRISMO

Sólo poseemos un ejemplo de las estructuras biomoleculares que solucionan los problemas presentados por los requisitos de la vida, y a la mente humana le resulta difícil crear imágenes mentales que sean realmente diferentes de las que ya conoce. Es por lo tanto difícil para nosotros imaginar cómo podría ser la vida en los ambientes planetarios que sean muy diferentes de los que tenemos en la Tierra. Percibiendo esta dificultad, nuestro comité decidió asumirla, utilizando una estrategia que empezó con la caracterización de la vida terráquea que la humanidad conoce bien, primero por su visibilidad macroscópica y luego a través de la observación microscópica que tuvo su inicio hace cuatro siglos. Desde luego que es éste un tipo de vida asociado con la humanidad. Como segundo paso en el proceso estratégico, el comité reunió una serie de observaciones sobre la vida que se considera exótica en comparación con la vida de tipo humano. La exploración de la Tierra ha llevado a los investigadores hasta los medios más hostiles para la vida de tipo humano, hábitats con la temperatura más alta en que sea posible el agua líquida, hábitats con la temperatura más baja en que sea posible el agua líquida;

hasta las profundidades del océano, donde las presiones son altísimas; hasta los extremos de la acidez y la alcalinidad; hasta los lugares donde el flujo de energía es demasiado fuerte para que pueda sobrevivir la vida de tipo humano; hasta sitios donde los desequilibrios termodinámicos son demasiado infrecuentes como para sustentar la vida de tipo humano y hasta localidades donde el entorno químico es demasiado tóxico para la vida de tipo humano.

Seguidamente el comité se preguntó, ¿existen en la Tierra medios donde los procesos darwinianos que utilizan una bioquímica de tipo humano no puedan utilizar los desequilibrios termodinámicos existentes? La respuesta es que prácticamente no existen. Al parecer, hay vida dondequiera que haya en la Tierra las condiciones termodinámicas mínimamente suficientes para la vida y dondequiera que haya agua. Por añadidura, la vida existente al parecer descende de una forma de vida ancestral que también fue el ancestro de la humanidad (a éste acaso no lo hubiéramos podido identificar si su ascendencia fuera de otro tipo) y que utiliza fundamentalmente una bioquímica de tipo humano.

El comité seguidamente examinó la evidencia sobre los procesos abióticos que manipulan las sustancias orgánicas en un medio ambiente planetario. Se preguntó si las moléculas que vemos en la vida contemporánea terráquea podían explicarse como las inevitables consecuencias de la reactividad abiótica. Aunque las firmas de esta reactividad predecesora pueden bosquejarse en la bioquímica contemporánea, generalmente son muy tenues.¹⁵ Unos 4000 millones de años de evolución biológica han impuesto una fuerte firma darwiniana en todo lo que haya sucedido antes; son objeto de intensa discusión las hipótesis respecto a la evidencia que aportan las modernas bioestructuras sobre nuestro supuesto linaje inanimado.

Si la vida se originó primero en la Tierra, fue hace mucho tiempo, cuando las condiciones en la superficie de este planeta eran muy diferentes de lo que hoy son. No sabemos cuáles fueron esas condiciones y acaso jamás lo sabremos. Además, los organismos que hoy existen son todos descendientes muy evolucionados de las formas de vida primigenias y probablemente contribuyeron hace mucho a la desaparición de sus menos aptos, más primitivos competidores. La tabla histórica ha sido borrada en su totalidad, tanto geológica como biológicamente. Por último, puesto que las formas de vida se replican, los sucesos singulares pueden tener un impacto enorme en los futuros desarrollos. La vida no tiene que ser el probable resultado de procesos fisicoquímicos espontáneos, pero es muy posible

¹⁵ S. A. Benner, A. D. Ellington y A. Tauer, "Modern Metabolism as a Palimpsest of the RNA World", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 86: 7054-7058, 1989.

que lo sea. Los argumentos basados en la probabilidad no son tan sólidos en esta área como usualmente lo son en las ciencias físicas.

El comité examinó el inventario de los medios en el Sistema Solar y se preguntó cuáles aparte de la Tierra podían ser adecuados para la vida del tipo terráqueo. Son pocos los lugares de este tipo, a menos que existan leyes hoy no conocidas que pudieran gobernar las etapas iniciales de la autoorganización de las estructuras y procesos bioquímicos que pudieran generar inevitablemente formas de vida evolutivas.¹⁶ La subsuperficie de Marte y los llamados océanos bajo el hielo de los satélites galileanos son los únicos sitios en el Sistema Solar (¡aparte de la Tierra misma!) claramente compatibles con la bioquímica terráquea.

Sin embargo, el examen del comité patentizó que la mayoría de los lugares en el Sistema Solar se encuentran en desequilibrio termodinámico —un requisito absoluto de la vida química—. Además, en muchos de los lugares donde hay desequilibrio termodinámico también hay solventes en forma líquida, así como hábitats donde los enlaces covalentes entre el carbono y otros elementos ligeros son estables. Estos dos últimos requisitos de la vida son menos determinantes, pero conjuntamente los tres se podrían considerar, acaso de manera simplista, como suficientes para la vida. El comité se preguntó si podía concebir la existencia de una bioquímica que se adaptara a esos medios exóticos, del mismo modo que la bioquímica del tipo humano se adapta a los medios terráqueos. Hay pocas hipótesis detalladas sobre este asunto; el comité examinó lo que se conoce, o podría especularse al respecto, y consideró cuáles podrían ser las orientaciones investigativas que acrecentaran o restringieran el conocimiento de la posibilidad de la vida en tales medios exóticos.

Finalmente, el comité consideró las soluciones más exóticas a los problemas que deben resolverse para crear las propiedades emergentes que estamos de acuerdo que caracterizan la vida. El comité propuso una jerarquía del “exotismo”.

- ¿Es esencial la dimensionalidad lineal de las moléculas biológicas? ¿O puede sustentarse la evolución darwiniana con un grupo de monómeros, o con moléculas bidimensionales?
- ¿Es necesario que un líquido estándar de algún tipo sea la matriz de la vida? ¿Podría serlo también un fluido supercrítico? ¿Puede existir la vida en la fase gaseosa? ¿En cuerpos sólidos, incluido el hielo?

¹⁶ S. A. Kauffman, *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-organization and Complexity*, Oxford University Press, Nueva York, 1995.

- ¿Debe guardarse en un polímero el contenido informativo de un sistema viviente? ¿Si es así, tiene que ser un biopolímero estándar? ¿O podría guardarse en forma mineral la información que sustenta la vida, o en una matriz que no esté relacionada molecularmente con los procesos darwinianos?
- ¿Son esenciales en los sistemas vivientes los procesos darwinianos, con su inherente lucha hasta la muerte? ¿Podrían sustentar el desarrollo de un tipo de vida compleja ciertos procesos altruistas (junto con sus estructuras moleculares) que no requieran la muerte y la extinción?

BIBLIOGRAFÍA

- Adami, C., y C. O. Wilke, "Experiments in Digital Life", *Artificial Life*, 10: 117-122, 2004.
- Allamandola, L. J., y D. M. Hudgins, "From Interstellar Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Ice to Astrobiology", en V. Pirronello y J. Krelowski (comps.), *Proceedings of the NATO ASI, Solid State Astrochemistry*, Kluwer, Dordrecht, 2003, pp. 1-54.
- Benner, S. A., A. D. Ellington y A. Tauer, "Modern Metabolism as a Palimpsest of the RNA World", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 86: 7054-7058, 1989.
- Brown, J. R., "Ancient Horizontal Gene Transfer", *Nature Reviews Genetics*, 4: 121-132, 2003.
- Cairns-Smith, A. G., *Genetic Takeover and the Mineral Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
- Claverie, J. M., "Viruses Take Center Stage in Cellular Evolution", *Genome Biology*, 7: 110, 2006.
- Cleland, C. E., y C. F. Chyba, "Defining 'Life'", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 32: 382-393, 2002.
- Forterre, P., "Three RNA Cells for Ribosomal Lineages and three DNA Viruses to Replicate their Genomes: A Hypothesis for the Origin of Cellular Domain", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103: 3669-3674, 2006.
- Grünberg, K., C. Wawer, B. M. Tebo y D. Schüler, "A Large Gene Cluster Encoding Several Magnetotactic Bacteria", *Applied Environmental Microbiology*, 67: 4573-4582, 2001.
- Joyce, G. F., R. Young, S. Chang, B. Clark, D. Deamer, D. DeVincenzi, J. Ferries, W. Irvine, J. Kasting, J. Kerridge, H. Klein, A. Knoll y J. J. Walker, "Forward", en D. W. Deamer y G. R. Fleischaker (comps.), *Origins of Life: The Central Concepts*, Jones y Barlett, Boston, 1994.
- Kauffman, S. A., *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-organization and Complexity*, Oxford University Press, Nueva York, 1995.

- Koonin, E. V., y W. Martin, "On the Origin of Genomes and Cells within Inorganic Compartments", *Trends in Genetics*, 21: 647-654, 2005.
- Martin, W., C. Rotte, M. Hoffmeister, U. Theissen, G. Gelius-Dietrich, S. Ahr y K. Henze, "Early Cell Evolution, Eukaryotes, Anoxia, Sulfide, Oxygen, Fungi First (?), and a Tree of Genomes Revisited", *IVMBB Life*, 55 (4-5): 193-204, 2003.
- Mazel, D., "IntegRons: Agents of Bacterial Evolution", *Nature Review of Microbiology*, 4: 608-620, 2006.
- Musmann, M., M. Richter, T. Lombardot, A. Meyerdierks, J. Kuever, M. Kube, F. O. Glöckner y R. Amann, "Clustered Genes Related to Sulfate Respiration in Uncultured Prokaryotes Support the Theory of their Concomitant Horizontal Transfer", *Journal of Bacteriology*, 187 (20): 7126-7137, 2005.
- Ochman, H., J. G. Lawrence y E. S. Groisman, "Lateral Gene Transfer and the Nature of Bacterial Innovation", *Nature*, 405: 299-304, 2000.
- Ricardo, A., M. A. Carrigan, "Is There a Common Chemical Model for Life in the Universe?", *Current Opinion in Chemical Biology*, 8: 672-689, 2004.
- Rosing, M. T., "¹³C-Depletes Carbon Microparticles in >3700-Ma Sea-Floor Sedimentary Rocks from West Greenland", *Science*, 283: 674-676, 1999.
- Sagan, C., "Extraterrestrial Life", en C. Sagan (comp.), *Communication with Extraterrestrial Intelligence (CETI)*, MIT Press, Cambridge, 1973.
- Shen, Y., R. Buick y D. E. Canfield, "Isotopic Evidence for Microbial Sulfate Reduction in the Early Archean Era", *Nature*, 470: 77-81, 2001.
- Shidlowksi, M. A., "A 3800-Million-Year Isotopic Record of Life from Carbon in Sedimentary Rocks", *Nature*, 333: 313-318, 1988.
- Ward, P., *Life as We Do Not Know It*, Viking, Nueva York, 2005.
- Woese, C. R., "On the Evolution of Cells", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99: 8742-8747, 2002.

TERCERA PARTE

LA VIDA ARTIFICIAL
Y LA BIOLOGÍA SINTÉTICA

Las discusiones de la primera y segunda partes hacen hincapié en que la vida como la conocemos hoy en la Tierra es un fenómeno extremadamente complejo que en el nivel abstracto posee características funcionales distintivas y en el físico contiene determinados elementos químicos, así como moléculas y vías bioquímicas específicas. Su complejidad, compuesta de múltiples niveles interconectados, le plantea problemas a los biólogos que pretenden generalizar la vida de todas las formas de vida: ¿cuáles son los aspectos de nuestro único ejemplo de vida inequívoco que son fundamentales en toda la vida posible? La vida artificial (también conocida como “ALife”) es un campo interdisciplinario cuya meta es obviar esta dificultad mediante la síntesis de procesos similares a los vitales, tanto aisladamente como en conjunto, en diferentes niveles analíticos. Esto les permite a los investigadores explorar mejor ciertas cuestiones cruciales, por ejemplo, si la sustancia que compone la vida es esencial para la vida. En las investigaciones de ALife subyace la idea de que una de las mejores maneras de entender algo consiste en aprender a construirlo. El término “artificial” se refiere al hecho de que los humanos se involucran en el proceso de la construcción, e indica que los resultados podrían ser bastante distintos a las formas de vida naturales. Entre los investigadores de la vida artificial se debate vivamente sobre cuáles son los tipos de vida artificial que se pueden considerar como genuinos ejemplos de vida, en vez de meras simulaciones o modelos de vida. La cuestión es, ¿en qué momento se puede considerar que una simulación o modelo de la vida es lo suficientemente completo como para ser equivalente a la vida natural?

Las investigaciones de la vida artificial pueden subdividirse en tres grandes categorías que reflejan tres tipos diferentes de métodos sintéticos.¹ La vida artificial “suave” crea simulaciones computacionales u otras construcciones puramente informáticas que tienen la apariencia de estar vivas. La vida artificial suave coincide en parte con la nueva ciencia de la biología de sistemas, la cual estudia sistemáticamente las interacciones complejas en los sistemas biológicos con la

¹ M. A. Bedau, “Artificial Life: Organization, Adaptation, and Complexity from the Bottom-Up”, *Trends in Cognitive Science*, 7: 505-512, 2003; M. A. Bedau, “Artificial Life”, en M. Matthen y C. Stephens (comps.), *Handbook of the Philosophy of Biology*, Elsevier, Ámsterdam, 2007, pp. 585-603.

ayuda de modelos computacionales. Sin embargo, mientras que la biología de sistemas busca captar detalles cuantitativos relacionados con sistemas biológicos reales y específicos, la vida artificial suave enfoca más la comprensión de los aspectos cualitativos de los sistemas vivientes hipotéticos. En el capítulo xxx, Stuart Kauffman describe dos ejemplos específicos de vida artificial suave. Algunos investigadores creen que la vida artificial suave es esencial para la progresiva investigación de la naturaleza de la vida, puesto que no hay forma de estudiar ciertos esquemas teóricos sin la ayuda de las simulaciones computacionales. Uno de los cuestionamientos de la vida artificial suave se relaciona con el hecho de si los procesos informacionales que enfoca —aquellos que ve como los esenciales para la vida— se derivan de lo que sabemos sobre la vida natural conocida en la Tierra. Al igual que con todos los intentos de generalizar con base en tan sólo un ejemplo de vida, existe la preocupación de que las formas de vida naturales conocidas acaso no representen el potencial total de la vida, y no tome en cuenta cosas importantes, aunque desconocidas. Algunas de éstas podrían ser ciertas características en el nivel abstracto e informativo, así como en el nivel físico de los elementos químicos, de las biomoléculas y de los procesos bioquímicos. Además, como argumentan Elliot Sober en el capítulo xvi y Margaret Boden en el capítulo xviii, no es obvio que sea posible estudiar ciertos aspectos funcionales de la vida importantes (por ejemplo, el metabolismo), independientemente de sus manifestaciones físicas.

La vida artificial “dura” implementa sistemas aparentemente vitales en estructuras hechas de silicona, acero y plástico. La vida artificial “dura” es una rama de la robótica que se basa específicamente en la hipótesis de que la mejor manera de crear robots con la misma capacidad para el comportamiento adaptativo autónomo que poseen las formas de vida naturales, consiste en hacer dispositivos que operen con base en los mismos principios abstractos de los sistemas vivientes. Algunos de los logros recientes de la vida artificial dura incluyen la primera aspiradora robótica comercial para uso doméstico, Roomba[®],² y los robots caminadores diseñados gracias a un proceso de evolución artificial y fabricados mediante procesos de construcción automáticos, que describen Lipson y Pollack en el capítulo xix. Estos robots acaso son el ejemplo contemporáneo más claro de una concepción mecanicista y cartesiana de la vida (*cf.* Descartes, en el capítulo ii).

La vida artificial “húmeda” utiliza los recursos de los laboratorios químicos y biológicos para sintetizar sistemas de tipo viviente en el tubo de ensayo. La vida

² R. Brooks, *Flesh and Machines: How Robots Will Change Us*, Pantheon, Nueva York, 2002.

artificial húmeda coincide en parte con la nueva ciencia de la biología sintética, la cual tiene por objeto el diseño y la construcción de partes, dispositivos, y sistemas biológicos nuevos, así como el rediseño de sistemas biológicos existentes para propósitos útiles. Sin embargo, casi toda la biología sintética tiende a ejercerse de “arriba-abajo” y consiste en modificar formas de vida existentes, mientras que la vida artificial húmeda es el tipo de biología sintética que se ejerce de “abajo-arriba” y que pretende construir formas de vida enteramente nuevas. En algunos aspectos importantes, estas nuevas formas de vida podrían ser distintas a todas las formas de vida que existen naturalmente en el universo; acaso se crearían mediante procesos que poco se parecerían al proceso natural del surgimiento inicial de la vida en la Tierra. En este contexto vale la pena señalar que algunos investigadores alegan que una teoría de la naturaleza de la vida no se puede desligar de una teoría del origen de la vida. Por ejemplo, Alexander Oparin (capítulo v) rechazaría la afirmación de que se podría crear una forma de vida mediante procesos diferentes de los que produjeron la primera forma de vida en la Tierra. Acaso la vida artificial húmeda pueda producir un contraejemplo verosímil del punto de vista de Oparin.

Desgraciadamente, son algo confusos los términos “vida artificial húmeda” y “biología sintética”. La confusión en parte se deriva de que la vida artificial húmeda y la biología sintética de abajo-arriba son esencialmente la misma actividad. Además, a la vida artificial húmeda bien se la podría llamar “biología sintética”, por causa del papel central de las metodologías sintéticas en la vida artificial. Los comentarios respecto a la biología sintética que emplean la frase “vida artificial” sólo hacen que aumente la confusión.

Es variable la reputación de la vida artificial; son muchos los científicos de la naturaleza que la descartan. Esto se debe en parte al sensacionalismo que suscitó en sus inicios (algo parecido al que suscitó la aparición de la inteligencia artificial). Pero en parte también porque muchas personas erróneamente identifican la vida artificial con la vida artificial *suave*. Cuando uno percibe que la vida artificial coincide en parte con la biología sintética, entiende que ambos programas son importantes para la biología y que podrían incluso contribuir a explicar la naturaleza de la vida. Algunos científicos creen que las investigaciones en estos campos proporcionan una explicación mucho más precisa y detallada de los requisitos moleculares mínimos de la vida celular simple; por lo tanto, son partidarios de la idea de que es posible explicar la vida con base en sus elementos constitutivos. En el otro extremo, si uno acepta la posibilidad de que la biología molecular, la vida artificial húmeda y la biología sintética pueden excluir, al explorar su ma-

nifestación química, ciertos principios fundamentales que gobiernan a los sistemas vivos, entonces uno puede empezar a entender cómo la vida artificial suave y la vida artificial dura son capaces de arrojar luz en la forma en que operan los sistemas vivos. Esto proporciona una perspectiva mucho más abstracta y funcional sobre la naturaleza de la vida.

Estas posibilidades ayudan a explicar por qué la aparición de la biología sintética y en especial de la vida artificial suave, dura y húmeda, actualmente promueve el estudio de la naturaleza de la vida. Para saber más sobre la amplitud real de la vida, es útil la exploración de una amplia gama de posibilidades hipotéticas de la vida, sobre todo porque actualmente sólo conocemos las formas de vida descubiertas hasta hoy en la Tierra. La vida artificial y la biología sintética constantemente producen nuevos tipos de sistemas que ponen en entredicho nuestras presuposiciones sobre la vida, y por lo tanto continuamente renuevan la pregunta sobre cuáles sistemas deben y merecen considerarse como sistemas vivos. La existencia de agentes aparentemente autónomos creados por la vida artificial dura, plantea la cuestión de si un dispositivo hecho de plástico, silicona y acero podría jamás estar literalmente vivo, como sugieren Lipson y Pollack (capítulo XIX). Los sucesivos avances tecnológicos y científicos habrán de producir robots con nuevos y más complejos tipos de comportamiento adaptativo, autónomo e intencional, acaso incluidas las capacidades de la autorreparación y la autorreproducción. Esto podría ocasionar que las tradicionales presuposiciones de que no es posible construir sistemas vivos con plástico, silicón y acero parecieran cada vez más provincianas, y que creciera nuestra incertidumbre sobre la exacta demarcación de los entes vivos.

De manera similar, la actual carrera (en la vida artificial húmeda) para sintetizar una célula artificial mínima o una protocélula en un tubo de ensayo (véanse los capítulos XX y XXI)³ nos pone frente a varias cuestiones importantes sobre la vida. Esta carrera requiere un acuerdo sobre cuáles deben ser los aspectos químicos que hay que sintetizar, y estos aspectos químicos deben abarcar más que los detalles químicos específicos de las formas de vida conocidas. Deamer en el capítulo XX y Luisi y sus colegas en el capítulo XXI proponen listas diferentes de las que según ellos son las propiedades químicas generales claves que hay que sintetizar en la biología sintética de abajo-arriba y en la vida artificial húmeda. Ya se ha logrado sintetizar muchas de ellas, y al continuar el avance en estas áreas

³ Véase también J. W. Szostak, D. P. Bartel y P. L. Luisi, "Synthesizing Life", *Nature*, 409: 387-390, 2001; S. Rasmussen *et al.*, "Transition from Nonliving Matter", *Science*, 303: 963-965, 2004; S. Rasmussen *et al.* (comps.), *Protocells: Bridging Nonliving and Living Matter*, MIT Press, Cambridge, 2008.

continuamente se tendrá que considerar si las propiedades químicas propuestas son o no cruciales en los sistemas vivientes. Nuestro conocimiento empírico de las manifestaciones químicas reales de estas propiedades, impedirá toda especulación puramente hipotética sobre su importancia para la vida. Las implicaciones sociales y éticas de crear nuevas formas de vida en el laboratorio, también habrán de incrementar la necesidad de entender lo que es la vida.⁴

La vida artificial suave, en particular, ha enfocado su atención en un aspecto muy específico de la naturaleza de la vida: ¿es realmente importante la materia de que se compone? Algunos investigadores piensan que un sistema computacional de vida artificial suave podría ser más que una mera *simulación* de la vida. Creen que los sistemas computacionales adecuadamente diseñados podrían estar *literalmente* vivos.⁵ La aseveración de que los sistemas de *software* podrían estar literalmente vivos se conoce como la tesis de la vida artificial (suave) “fuerte”. Esta tesis es análoga a la tesis de la inteligencia artificial “fuerte”, según la cual una computadora digital común adecuadamente programada podría ser literalmente inteligente, por lo menos tanto como un ser humano común. De manera similar, la vida artificial (suave) fuerte es la idea de que una computadora digital común adecuadamente programada (o para decirlo con más precisión, las estructuras informativas que se implementan en la computadora) podría estar literalmente viva, tan viva como cualquier ave, escarabajo o bacteria. Las formas de inteligencia artificial y de vida artificial fuertes contrastan con los relativamente poco controvertidos alegatos “débiles” de que los sistemas de *software* de la inteligencia artificial y de la vida artificial nos pueden enseñar mucho sobre la inteligencia y la vida. Muchas de las discusiones filosóficas de la vida artificial suave se interesan en la tesis fuerte; véase, por ejemplo, en este libro el capítulo XVI de Sober, el capítulo XVII de Lange y el capítulo XVIII de Boden. (También discutimos más adelante ciertas tesis “fuertes” sobre la vida artificial fuerte y la vida artificial húmeda.)

Las construcciones producidas por la vida artificial y la biología sintética podrían aumentar el número de las formas de vida conocidas. También han llamado la atención en la complejidad de la cuestión de la naturaleza de la vida. Los intentos de crear nuevas formas de vida no pueden ponerse en marcha sin algún tipo de preconcepción sobre las propiedades cruciales de los sistemas vivientes. Los

⁴ M. S. Garfinkel *et al.*, “Synthetic Genomics: Options for Governance”, *Biosecure Bioterror*, 5 (4): 359-362, 2007; M. A. Bedau y E. C. Parke (comps.), *The Ethics of Protocells. Moral and Social Implications of Creating Life in the Laboratory*, MIT Press, Cambridge, 2009.

⁵ C. G. Langton, “Artificial Life”, en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, Redwood City, 1989, pp. 1-47; T. S. Ray, “An Approach to the Synthesis of Life”, en C. Langton *et al.* (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, 371-408.

capítulos de la primera y segunda partes de este libro proporcionan muchos ejemplos de tales presuposiciones sobre la vida, tales como que los sistemas vivos deben involucrar un metabolismo (por ejemplo, Schrödinger en el capítulo IV y Oparin en el capítulo V) o que los sistemas vivos deben estar compuestos de macromoléculas (por ejemplo, Mayr en el capítulo VI y Pace en el capítulo XI). Las construcciones de la vida artificial y de la biología sintética pueden ayudarnos a cuestionar y revisar algunas de estas presuposiciones, tal como se hace en el capítulo XVI por Sober, el capítulo XVII por Lange, y el capítulo XVIII por Boden, así como en la cuarta parte en el capítulo XXXI por Bedau y en el capítulo XXX por Kauffman. Esto plantea la cuestión de si hay o no una base firme a partir de la cual se pueda establecer si nuestras presuposiciones sobre la vida deben o no cuestionarse y revisarse. Incluso plantea la cuestión espectral de que la vida no posee una naturaleza específica, como Keller afirma categóricamente en el capítulo XXII.

La tesis fuerte de la vida artificial suave es el enfoque central del capítulo XVI, donde el filósofo Elliot Sober examina la analogía entre la filosofía de la mente y la filosofía de la vida. La premisa central de la inteligencia artificial fuerte es la supuesta posibilidad de la realización múltiple de los estados mentales, es decir, la suposición de que criaturas construidas con una muy amplia gama de diferentes tipos de materiales puedan poseer estados mentales. Esta multiplicidad de realizaciones físicas de estados mentales hace que sea imposible identificar estados mentales con cualquier tipo de propiedades físicas específicas. Una consecuencia de esto es que sería más factible que una computadora adecuadamente programada experimentara estados mentales genuinos: la tesis de la inteligencia artificial fuerte. Se llama “funcionalismo” a la teoría filosófica comúnmente asociada con la inteligencia artificial fuerte, teoría que sostiene que la posesión de estados mentales no se determina por la composición material específica de un ente, sino por la organización funcional de esa materia. Según esta idea, los estados mentales pueden realizarse en una vasta multiplicidad de materiales, puesto que las propiedades esenciales de los estados mentales son funcionales, no materiales.

El funcionalismo relacionado con la mente es análogo a la perspectiva ampliamente aristotélica sobre la vida (véase el capítulo I), según la cual las propiedades esenciales de los sistemas vivos son sus capacidades funcionales, más que su composición material. A fin de determinar la factibilidad del funcionalismo en la vida, Sober investiga hasta qué punto las propiedades biológicas fundamentales también son realizables de manera múltiple. Sober concluye que algunas propiedades biológicas, tales como la adecuación o la conducta de los depredadores y de las presas, se encuentran en muchos casos, mientras que otras, tales como la

propiedad de ser una sustancia hereditaria, están limitadas significativamente por las leyes de la química y de la física. En los capítulos XI y XII se exponen detalladamente algunas investigaciones científicas sobre estos tipos de restricciones. Las restricciones físicas y químicas de las formas de vida posibles proporcionan una razón para cuestionar el funcionalismo relacionado con la vida, pero no lo refutan necesariamente, ya que todas las formas del funcionalismo les permitirán a la química y a la física restringir los tipos de materiales que pudieran realizar las propiedades funcionales en cuestión. El aspecto crítico en el funcionalismo de la vida es el grado en que las características esenciales de la vida son independientes de su composición material. Las versiones modestas del funcionalismo requieren que tan sólo algunos de los aspectos esenciales de la vida sean totalmente independientes de la sustancia que la compone, mientras que un planteamiento cabalmente funcionalista requiere que todos sean independientes; este último criterio respalda la posición de la vida artificial (suave) fuerte. Las diferentes versiones del funcionalismo imponen diferentes grados de rigurosidad, y los pros y los contras de las versiones alternativas son cuestiones abiertas al debate.

Otra cuestión adicional que Sober plantea específicamente se relaciona con las realizaciones computacionales de la vida. Los sistemas computacionales que aparentemente imitan las propiedades fundamentales de los sistemas vivientes constituyen la principal motivación de la tesis fuerte de la vida artificial suave. Sober señala que algunos procesos biológicos, como la digestión y el metabolismo, al parecer no son computacionales, y esto pone en duda que cualquier sistema puramente computacional pudiera estar literalmente vivo. Por estas razones, junto con otras, Sober concluye que son pocas las posibilidades de la vida artificial (suave) fuerte. Es debatible si este tipo de argumentos pueden oponerse a la vida artificial fuerte y a la vida artificial húmeda, o a la biología sintética de abajo-arriba.

El campo de la vida artificial presupone que la distinción entre la vida y la no vida es un tema importante para la investigación científica, pero no todo el mundo estaría de acuerdo con esto. Sober, por ejemplo, se pregunta en el capítulo XVI si a los biólogos realmente les preocupa esta distinción. El filósofo Marc Lange expone dos aspectos centrales de esta cuestión en el capítulo XVII: cómo entender los sellos distintivos de la vida, y qué concluir respecto a la conocida dificultad de definir la vida. Muchos son los autores que han subrayado los sellos distintivos de los sistemas vivientes, tales como la habilidad para reproducirse, crecer, responder al medio ambiente y evolucionar, y estas propiedades a veces se usan para caracterizar o definir la vida. Sin embargo, Lange nos señala los muy conocidos contraejemplos de tales caracterizaciones (véase también el capítulo XXVI). Una

importante cuestión abierta sobre la naturaleza de la vida es cómo entender el estatus de estos sellos distintivos. ¿Son postulados preteóricos que toda concepción válida de la vida debe respetar? ¿Si es así, por qué razón? ¿Son simplemente presuposiciones comunes que el progreso científico podría eliminar? ¿Si es así, con base en qué? Uno puede percibir la tensión que estas preguntas generan cuando se discuten estas propiedades (véanse, por ejemplo, los capítulos VI, VII, XV y XXIV). Lange hace un importante señalamiento en relación con los sellos distintivos de la vida. En vez de preguntar solamente si un sistema muestra o no cierto sello distintivo, Lange nos dice que debemos preguntar si un sistema muestra el sello distintivo “por la misma razón” que los sistemas vivientes paradigmáticos lo hacen. Si no es así, entonces la presencia de los sellos distintivos podría ser irrelevante respecto al hecho de que sea o no un sistema viviente.

La dificultad de definir la vida a veces se entiende como una sugerencia de que la distinción vida/no-vida tiene poca utilidad en la biología (véanse, por ejemplo, los capítulos XVI y XXVIII). Lange responde diciendo que las preocupaciones respecto a la definición de la vida deben separarse de las preocupaciones respecto a la legitimidad y la utilidad del concepto de la vida. Lange indica que los conceptos científicos con frecuencia tienen demarcaciones imprecisas, por lo que las imprecisiones del concepto de la vida no significan que éste sea poco científico, inútil o, de alguna manera, falso. Lange concluye que aun en el caso de que los biólogos no puedan definir la vida definitivamente o no puedan reducir la vida a otras propiedades independientes inteligibles, la vida seguirá siendo una categoría natural, y de hecho la propiedad de estar vivo podría explicar por qué los sistemas vivientes muestran los característicos signos distintivos de la vida.

La idea de que el metabolismo es una propiedad característica de los sistemas vivientes se remonta a la aristotélica capacidad de la autonutrición (capítulo I) y todavía se acepta por muchos. Por ejemplo, Erwin Schrödinger alega en el capítulo IV que el metabolismo es necesario porque les permite a los sistemas vivientes ordenados y complejos enfrentarse a la segunda ley de la termodinámica y sobrevivir; Pace en el capítulo XI, y Benner en el capítulo XII, en sus investigaciones sobre las restricciones químicas y físicas para todos los sistemas vivientes posibles, presuponen que todas las formas de vida necesitan un metabolismo. En el capítulo XVIII la filósofa Margaret Boden evalúa tanto la vida artificial suave como la vida artificial dura desde la perspectiva del papel del metabolismo, distinguiendo tres grados de metabolismo. El metabolismo₁ es la propiedad de aquellos sistemas que para sobrevivir dependen de la energía. El metabolismo₂ es la propiedad de aquellos sistemas que para activar el comportamiento de su cuerpo utilizan paque-

tes de energía. El metabolismo₃ es la propiedad de utilizar los paquetes de energía para mantener el cuerpo y activar su comportamiento. Boden ofrece esta diferenciación a fin de enfocar el tercer grado de metabolismo, ya que una premisa central de su argumento es que el metabolismo₃ desempeña un papel imprescindible en cualquier explicación aceptable de la vida genuina. La otra premisa central de su argumento es que tanto la vida artificial suave como la vida artificial dura se abstraen del metabolismo₃. Sobre la base de ambas premisas, se sigue directamente que ni la vida artificial suave ni la vida artificial dura pueden producir formas de vida genuinas; en otras palabras, es falsa la tesis fuerte de la vida artificial suave y de la vida artificial dura (pero la tesis fuerte de la vida artificial húmeda no peligra). El argumento de Boden resalta la función del metabolismo en la vida, y nos incita a examinar nuevamente la naturaleza y el estatus del requisito de que las formas de vida tienen que poseer un metabolismo. Aunque admitamos que todas las formas de vida poseen un metabolismo, ¿por qué pensar que esto tiene que ser así para toda forma de vida posible? ¿Es un descubrimiento sobre la naturaleza misma la idea de que la vida tiene que involucrar un metabolismo, o simplemente refleja una opción contingente relacionada con nuestra utilización de la palabra “vida”?

Esta fuerte conexión entre la vida y el metabolismo que Boden defiende, la rechazan los científicos de la computación Hod Lipson y Jordan Pollack en el capítulo XIX, donde describen el diseño y manufactura automatizada de “formas de vida” robóticas a partir de plástico, silicona y acero, ilustrando así algunos de los logros de la vida artificial dura. Lipson y Pollack hacen hincapié en el hecho de que las formas de vida biológicas conocidas controlan los medios de su propia reproducción (asunto que Kant, entre otros autores, enfatiza —véase el capítulo III—), lo cual contrasta con el proceso controlado por humanos mediante el cual se construye usualmente a los robots. Lipson y Pollack dan un paso significativo hacia la reproducción autónoma de los robots mediante el acoplamiento de un algoritmo genético para someter a prueba y mejorar autónomamente el diseño de los robots, con un proceso evolutivo automatizado para fabricar los robots. Diseñaron sus robots simplemente para que se desplazaran de un lado a otro del piso, pero resultó crucial que realmente funcionaran en el mundo real. Los construyeron con tres tipos de partes: tiras de plástico conectadas con juntas esféricas, impulsores lineales que se accionaban hacia adelante y hacia atrás en línea recta mediante un motor eléctrico, y una red neural artificial que controlaba los impulsores lineales.

El cuerpo (las tiras de plástico conectadas y los impulsores) y el cerebro (las redes neurales) de estos robots se diseñaron mediante un proceso evolutivo aná-

logo a la evolución mediante la selección natural que ha dado forma a la vida biológica. El proceso evolutivo de Lipson y Pollack ha creado generaciones sucesivas de diseños de robots posibles. Cada diseño de una población se puso a prueba con una simulación computacional para determinar con qué rapidez se podía mover a lo largo del piso. Luego los mejores diseños se “mutaban” para producir la siguiente generación de diseños de robots. Tras repetir este proceso de selección y mutación durante un número de generaciones, los mejores diseños resultantes se fabricaron con una tecnología automatizada veloz, mediante la impresión de capa tras capa de partes de plástico. Los robots resultantes están bien diseñados y poseen los aspectos teleológicos que caracterizan a la vida en general (véanse el capítulo I de Aristóteles, el capítulo III de Kant, el capítulo XXIX de Dawkins, el capítulo V de Oparin y el capítulo VI de Mayr, entre otros). Aunque Lipson y Pollack aún no han automatizado el proceso mediante el cual estos robots se reproducen a sí mismos, han avanzado mucho en este sentido. Esta emocionante posibilidad le da gran realce a la cuestión de si una población de robots que actúan y se reproducen de manera totalmente autónoma estaría o no literalmente viva, contrastando con lo que Boden argumenta.

El estado actual de la vida artificial húmeda y la biología sintética de abajo-arriba se examina en los capítulos XX y XXI. El biofísico David Deamer en el capítulo XX concluye que “la posibilidad de la vida en un tubo de ensayo siempre ha parecido cercana y hoy esta posibilidad está más cercana que nunca”. Esta conclusión descansa en el análisis de 12 mecanismos químicos que se podría alegar que deben integrarse para que pueda emerger en el laboratorio incluso el microorganismo más sencillo. Según Deamer, incluso las formas de vida más sencillas muestran una serie compleja de 12 mecanismos moleculares interconectados, y el hecho de que la vida requiera estos 12 complejos pasos químicos explica por qué es tan difícil definir la vida. Ejemplos de los 12 requisitos químicos de la vida de Deamer incluyen el requisito de que las membranas fronterizas se auto-ensamblen a partir de moléculas de tipo jabonoso para formar compartimentos microscópicos de tipo celular; el requisito de que la energía sea capturada por las membranas, ya sea a partir de la luz en un sistema de pigmentos o ya sea a partir de energía química (o de ambas cosas); el requisito de que las macromoléculas se encapsulen en los compartimentos pero que las moléculas más pequeñas puedan atravesar la barrera de la membrana a fin de proporcionar los nutrientes y la energía química para el metabolismo primitivo, y el requisito de que las macromoléculas crezcan mediante la polimerización de las moléculas nutrientes.

Todos y cada uno de los requisitos para la vida de Deamer se han realizado en su mayor parte en el laboratorio. El reto principal restante consiste en lograrlos no separadamente, sino concertadamente. La integración química de los requisitos para la vida podría ser algo más fácil de lo que Deamer cree, ya que algunos de los elementos en la lista podrían ser opcionales. Por lo menos esta es la presuposición tras el diseño del llamado “Los Alamos bug”,⁶ que puede carecer de membrana demarcadora, de genes para la síntesis de la proteína y de proteínas (y por lo tanto, de catalizadores típicos) totalmente. De esta manera, el intento de crear nuevas formas de vida en el laboratorio nos incita a repensar la naturaleza de la vida.

Uno de los pioneros de la vida artificial húmeda es el químico italiano Pier Luigi Luisi. En el capítulo XXI Luisi y sus colegas revisan detalladamente la historia reciente de la vida artificial húmeda, enfocando los intentos de crear una célula mínima en el laboratorio. Los trabajos del equipo de Luisi se basan en la teoría de la autopoiesis desarrollada por Maturana y Varela,⁷ y sus logros pueden verse como pasos hacia la realización química de algo parecido al chemoton de Gánti (capítulo VII). Se supone que una “célula mínima” es la forma de vida más simple posible. Una simplificación sería comprimir el genoma tanto como fuera posible; el capítulo esboza una forma de vida muy primitiva y tenue que sólo requeriría de 45 a 50 genes. En un extremo más complejo hay esquemas que integran moléculas complejas (con frecuencia catalizadores, incluidas especialmente las polimerasas) y subestructuras celulares complejas (especialmente los ribosomas), extraídos de formas de vida existentes (típicamente, bacterias).

El diseño de la célula mínima de Luisi se inspira en una idea de la vida bastante común, según la cual la vida implica esencialmente la conjunción de tres procesos: el automantenimiento o el metabolismo, la autorreproducción y la capacidad para evolucionar. Luisi examina los logros claves de la química de abajo-arriba hasta la fecha que se aproximan a las células mínimas (lo que Luisi llama la vida “coja”). Primero, mucho trabajo experimental ha demostrado que los liposomas (contenedores esféricos microscópicos hechos de una membrana de dos capas que se autoensamblan espontáneamente en soluciones acuosas a partir de moléculas anfifílicas) pueden funcionar como contenedores para reacciones moleculares biológicas complejas.⁸ Estos liposomas crecen espontáneamente a partir de precursores anfifílicos, y también se multiplican espontáneamente. Las re-

⁶ S. Rasmussen *et al.*, “Bridging Nonliving and Living Matter”, *Artificial Life*, 9: 269-316, 2003.

⁷ J. Maturana y F. Varela, *Autopoiesis and Cognition. The Realization of the Living*, D. Reidel, Boston, 1980.

⁸ S. Rasmussen *et al.* (comps.), *Protocells: Bridging Nonliving and Living Matter*, *op. cit.*

acciones bioquímicas que se han producido dentro de los liposomas contienen la síntesis del ARN y de proteínas, incluidas las críticas proteínas formadoras de poros y las enzimas polimerasas. Algunos de estos resultados dependen de equipos comerciales de extracción de células, complejas cajas negras químicas que contienen millones de constituyentes moleculares de células vivientes simples.

Las investigaciones en el campo de la vida artificial húmeda y en la biología sintética de abajo-arriba descritas por Deamer y Luisi son interesantes, en parte porque la posibilidad de crear formas de vida totalmente nuevas en el laboratorio es mucho más real de lo que la gente piensa.⁹ Al acercarnos a esta meta y al alcanzarla finalmente, y al surgir cada vez más tipos de formas de vida artificial diferentes en el laboratorio, nuestras presuposiciones sobre la naturaleza de la vida se mostrarán cada vez más vulnerables.

Casi todos los puntos de vista sobre la naturaleza de la vida presuponen que la vida es un tipo natural, es decir, una categoría de objetos unificada por una similitud objetiva real. El debate consiste en determinar exactamente las propiedades que definen esa categoría. Al reflexionar en la vida artificial y en la biología sintética, la historiadora y filósofa Evelyn Fox Keller en el capítulo xxii cuestiona esta presuposición. Ella alega que la vida no es un tipo natural, sino un “tipo humano”, es decir, una categoría de objetos unificada meramente por la estipulación o la convención humana. Ahora bien, la distinción entre los tipos naturales y los humanos es una cuestión filosófica difícil, una cuestión abierta, y algunos autores dudan de la noción misma de los tipos naturales. El escepticismo de Keller presumiblemente no es global, sino que más bien pretende diferenciar el concepto de la vida de otros conceptos científicos centrales que son realmente tipos naturales (por ejemplo, el elemento oxígeno, la sustancia agua, y las categorías químicas de los ácidos y las bases).

La perspectiva de Keller se opone a las ideas presentadas en la mayoría de los capítulos de este libro. Ya sea que surja de la astrobiología y el intento de entender el origen de la vida, o que esté motivado por la vida artificial y la biología sintética, el interés filosófico y científico reciente en la naturaleza de la vida asume por lo general que la distinción entre la vida y la no vida es objetiva e independiente de los intereses humanos. Keller conjunta diversas consideraciones para respaldar la afirmación de que la vida es un tipo humano. Una es que la idea de que en los entes vivientes existe una propiedad definitoria que no se encuentra en los entes no vivientes, es un producto contingente de la historia humana, el cual según ella se

⁹ Para un repaso del campo, véase S. Rasmussen *et al.* (comps.), *Protocells: Bridging Nonliving and Living Matter*, *op. cit.*

puede ubicar en el siglo XIX. Otra es el hecho de que todos los intentos por encontrar la esencia de la vida han fracasado. Además, mientras más sabemos sobre la vida, menos estable resulta nuestra idea de la naturaleza de la vida. Los intentos por salvar el abismo entre la vida y la no vida en el laboratorio tienden a disolver la frontera entre ambas. Cuando intentamos articular los pasos diferentes entre la vida y la no vida, descubrimos una gradual transición de muchos tonos grises, no una precisa línea divisoria que demarque lo negro de lo blanco. Para Lange (capítulo XVII) y Cleland y Chyba (capítulo XXVI) esto no representaría un problema, puesto que, como ellos lo señalan, la mayoría de los tipos (tanto los naturales como los no naturales) son vagos y pueden incluir casos extremos. Además, según Keller, el progreso científico y tecnológico de la vida artificial y la biología sintética viola nuestras taxonomías anteriores y nos exige que inventemos conceptos nuevos. Si optamos por utilizar el viejo término de “vida” para referirnos a estos nuevos conceptos, lo hacemos, según ella, por una mera estipulación o convención humana. Ningún concepto sobre la naturaleza depende de que llamemos o no “vivos” a los sistemas de *software* de la vida artificial o a los robots o a las células artificiales creadas en el laboratorio, de manera que la cuestión de si “realmente” están vivos o no es irrelevante. Pero como Cleland y Chyba precisan, la historia de la ciencia revela que las teorías científicas nuevas frecuentemente cambian las viejas taxonomías y los viejos conceptos, y ésta no es meramente una cuestión de la estipulación o la convención humanas. Muchos de los problemas que Keller cita podrían no ser más que el reflejo de la imperfección de nuestro actual concepto de la vida, más que un hecho objetivo relacionado con la desunión de la vida.

La vida artificial y la biología sintética también se discuten en las otras secciones de esta compilación; por ejemplo en los capítulos XV, XXVIII, XXX y XXI. Estos últimos corresponden temáticamente con los temas centrales de esta parte, y los lectores interesados en lo que la vida artificial y la biología sintética nos pueden enseñar sobre la naturaleza de la vida (o viceversa) deberán leerlos junto con los de esta parte.

BIBLIOGRAFÍA

- Bedau, M. A., “Artificial Life”, en M. Matthen y C. Stephens (comps.), *Handbook of the Philosophy of Biology*, Elsevier, Ámsterdam, 2007, pp. 585-603.
- , “Artificial Life: Organization, Adaptation, and Complexity from the Bottom-Up”, *Trends in Cognitive Science*, 7: 505-512, 2003.

- Bedau, M. A., y E. C. Parke (comps.), *The Ethics of Protocells. Moral and Social Implications of Creating Life in the Laboratory*, MIT Press, Cambridge, 2009.
- Brooks, R., *Flesh and Machines. How Robots Will Change Us*, Pantheon, Nueva York, 2002.
- Garfinkel, M. S., et al., "Synthetic Genomics: Options for Governance", *Biosecur Bioterror*, 5 (4): 359-362, 2007.
- Langton, C. G., "Artificial Life", en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, Redwood City, 1989, pp. 1-47.
- Maturana, H., y F. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, D. Reidel, Boston, 1980. [Versión en español: *De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: la organización de lo vivo*, Editorial Universitaria, Santiago de Chile, 2006.]
- Rasmussen, S., M. A. Bedau, L. Chen, D. Deamer, D. Krakauer, N. H. Packard y P. F. Stadler, *Protocells: Bridging Nonliving and Living Matter*, MIT Press, Cambridge, 2008.
- Rasmussen, S., L. Chen, D. Deamer, D. C. Krakauer, N. H. Packard, P. F. Stadler y M. A. Bedau, "Transition from Nonliving to Living Matter", *Science*, 303: 963-965, 2004.
- Rasmussen S., L. Chen, M. Nilson y A. Shigeaki, "Bridging Nonliving and Living Matter", *Artificial Life*, 9: 269-316, 2003.
- Ray, T. S., "An Approach to the Synthesis of Life", en C. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992.
- Szostak, J. W., D. P. Bartel y P. L. Luisi, "Synthesizing Life", *Nature*, 409: 387-390, 2001.

Elliot Sober

XVI. ENSEÑANZAS DEL FUNCIONALISMO: EL PORVENIR DE LA VIDA ARTIFICIAL FUERTE*

DOS USOS DE LAS COMPUTADORAS

Las computadoras podrían desempeñar dos papeles muy diferentes en la teorización biológica. Los modelos matemáticos de los procesos biológicos con frecuencia son analíticamente intratables. Cuando resulta así, es posible usar las computadoras para obtener un atisbo de la dinámica del modelo. Uno introduce una serie de valores y condiciones iniciales y permite que las reglas de la transición se conjuguen (con frecuencia iterativamente); luego uno examina los resultados.

Así, el teorizador usa las computadoras como una ayuda. Son como el papel y el lápiz o la regla de cálculo. Ayudan a pensar. Los modelos que se investigan son modelos de la vida. Pero no es necesario ver como entes vivientes a las computadoras que nos ayudan a investigarlos. Las computadoras se pueden utilizar para calcular lo que puede suceder cuando se sobrecarga un puente, pero la computadora misma no es un puente.

La genética de poblaciones ha utilizado así las computadoras desde el decenio de 1960. Muchos de los investigadores en el campo de la vida artificial hoy hacen lo mismo. Para mí, esta utilización de las computadoras no es nada controvertido. Por sus frutos los conoceréis. Esta área del programa de investigaciones de la vida artificial saldrá victoriosa o se derrumbará, de acuerdo con el valor de los modelos investigados. Cuando es obvio de antemano cuál será la dinámica del modelo, los resultados proporcionados por la simulación computacional serán poco interesantes. Cuando el modelo es muy poco realista, la investigación mediante la computadora de sus propiedades también será poco interesante. Pero cuando un modelo es suficientemente realista y los resultados de la simulación computacional son suficientemente sorprendentes, nadie puede negar el beneficio que se ha obtenido.

* Este capítulo apareció originalmente en C. G. Langton *et al.* (comps.), *Artificial Life II*, Westview Press, Boulder-Oxford, 2003, pp. 749-765.

Antes mencioné que las computadoras pueden ayudarnos a entender los puentes, aun cuando una computadora no es un puente. Sin embargo, la segunda parte del programa de investigaciones de la vida artificial se interesa en la idea de que las computadoras mismas son ejemplos de procesos biológicos. Considera que la computadora es un ente viviente, o que muestra varias de las propiedades que todos consideramos como características de la vida.

Es necesario separar del primero este segundo aspecto del programa de investigaciones de la vida artificial. No es muy controvertido el hecho de que las computadoras puedan ser herramientas para investigar la vida; en cambio, es bastante cuestionable el hecho de sugerir que las computadoras son o pueden ser entes vivientes.

Pasando ahora de la vida artificial a la inteligencia artificial, nuevamente podemos discernir dos posibles utilizaciones de las computadoras. Primero, la utilización de las computadoras como herramientas para investigar modelos psicológicos que son demasiado complejos matemáticamente como para solucionarse analíticamente. Ésta es la idea de que las computadoras son herramientas para entender la mente. Segundo, y separadamente, está la idea que considera que las computadoras son mentes. Esta última consideración, *grosso modo*, es lo que usualmente se denomina la “inteligencia artificial fuerte”.

La inteligencia artificial fuerte ha atraído mucho interés, tanto el de sus partidarios como el de sus adversarios. No se ha criticado mucho, ni había por qué criticar, la idea de que las computadoras, al igual que el lápiz y el papel, son herramientas para entender modelos psicológicos. Aquí, como en el caso de la vida artificial, por sus frutos los conoceréis.

Así, tanto en la inteligencia artificial (IA) como en la vida artificial (VA), la consideración de que las computadoras son herramientas para investigar una teoría, es bastante diferente de la consideración de que las computadoras son parte del contenido de la teoría. Todavía diré algo más sobre el concepto de la herramienta, aunque a veces insistiré en la importancia de no confundirla con el concepto del contenido. El cuadro XVI.1. muestra el paralelismo entre la IA y la VA; también ayuda a mantener la distancia apropiada entre el concepto de la herramienta y el concepto del contenido: claro es que el calificativo de “fuerte” no denota la verosimilitud o lo bien fundado; “fuerte” denota atrevimiento y “débil” denota modestia.

¿De dónde proviene la idea de que las computadoras podrían ser parte del contenido de las teorías psicológicas y biológicas? La filosofía reciente ha discutido mucho las cuestiones psicológicas, pero muy poco el problema biológico.

CUADRO XVI.1. *Paralelismo entre la IA y la VA*

	<i>Psicología</i>	<i>Biología</i>
Las computadoras son herramientas para investigar	IA débil	VA débil
Las computadoras son parte del contenido	IA fuerte	VA fuerte

¿Será posible estructurar un argumento respecto a las computadoras vivientes que sea paralelo al argumento respecto a las computadoras pensantes? Hasta dónde puede llegar esta analogía es lo que yo pretendo determinar.

EL PROBLEMA DE LA MENTE Y EL PROBLEMA DE LA VIDA

El problema mente/cuerpo ha sido el objeto de diversas teorías de vanguardia. En el inicio del decenio de 1950, Ryle¹ y Wittgenstein² propusieron sendas versiones del conductismo lógico. Es la teoría de que el significado de los términos mentales puede especificarse totalmente en términos conductuales. Ryle atacó el Mito del Fantasma en la Máquina, el cual incluía la idea de que los estados mentales son las causas internas de la conducta externa.

Desde mediados del decenio de los cincuenta hasta mediados de los sesenta el conductismo mismo se impugnó por los teóricos de la identidad mente/cerebro. Los materialistas australianos como Place³ y Smart⁴ alegaron que los estados mentales son causas internas. Pero yendo más allá, afirmaron que se habría de demostrar que las propiedades mentales eran idénticas a las propiedades físicas. Mientras que los conductistas lógicos usualmente defendían sus ideas de manera apriorística, los teóricos de la identidad decían que ellos estaban en vías de formular una tesis empírica cuya validez sería demostrada por el desarrollo futuro de la ciencia.

La teoría de la identidad puede dividirse en dos afirmaciones. Sus partidarios aseguraban que todos y cada uno de los objetos mentales son entes físicos. Tam-

¹ G. Ryle, *The Concept of Mind*, Barnes & Noble Inc., Nueva York, 1949.

² L. Wittgenstein, *Philosophical Investigations*, Basil Blackwell, Oxford, 1953.

³ U. T. Place, "Is Consciousness a Brain Process?", *British Journal of Psychology*, 47: 44-50, 1956.

⁴ J. J. C. Smart, "Sensations and Brain Processes", *Philosophical Review*, 68: 141-156, 1959.

bién afirmaban que todas y cada una de las propiedades mentales son propiedades físicas. En la primera categoría se ubican los procesos mentales, las creencias, los recuerdos, las imágenes. En la segunda, por ejemplo, creer que la nieve es blanca y sentir dolor. Esta división puede parecer algo artificial: ¿por qué diferenciar el hecho de que yo crea que la nieve es blanca de la propiedad de creer que la nieve es blanca? Un poco más adelante, el sentido de esta división se aclarará.

A mediados del decenio de los sesenta una teoría que los filósofos llamaron el funcionalismo retó a la teoría de la identidad. Hilary Putnam,⁵ Jerry Fodor⁶ y Daniel Dennett⁷ alegaron que las propiedades psicológicas son realizables de muchas maneras. Si esto es cierto, entonces se debe rechazar la teoría de la identidad.

Una analogía nos ayudará a entender lo que significa la multiplicidad de lo realizable. Pensemos en las trampas para ratas. Todas son objetos físicos. Algunas están hechas de alambre, madera y queso. Otras están hechas de plástico y veneno. Todavía otras están constituidas por montones de filósofos que corren de un lado a otro armados con cestos para papeles.

¿Qué tienen en común todas estas trampas para ratas? Pues bien, todas están hechas con materiales. Pero, más específicamente, ¿qué propiedades comparten todas que sean exclusivas de las trampas para ratas? Si las trampas para ratas son realizables de muchas maneras, entonces no existe una propiedad física que todas las trampas para ratas, y sólo las trampas para ratas, poseen.

Todas y cada una de las trampas son cosas físicas, pero la propiedad de ser una trampa para ratas no es solamente una propiedad física. Aquí expongo la distinción entre el objeto y la propiedad que mencioné antes.

Así como existen muchas maneras de construir físicamente una trampa para ratas, según los funcionalistas también existen muchas maneras de construir físicamente una mente. La nuestra está hecha de ADN y neuronas. Pero acaso las computadoras podrían poseer una mente. Y acaso hay organismos de otras especies o de otras galaxias que posean una mente cuya organización física sea muy diferente de la nuestra. Cada mente es una cosa física, pero la propiedad de tener una mente no es una propiedad física.

No he mencionado la teoría del dualismo. El dualismo afirma que la mente está hecha de una sustancia inmaterial. Los teóricos de la identidad rechazan el dualismo, tanto como los funcionalistas. La relación entre estas tres teorías puede

⁵ H. Putman, "The Nature of Mental States", en H. Putman, *Mind, Language, and Reality*, Cambridge University Press, Cambridge, 1975, pp. 429-440.

⁶ J. A. Fodor, *Psychological Explanation: An Introduction to the Philosophy of Psychology*, Random House, Nueva York, 1968.

⁷ D. C. Dennett, *Brainstorms: Philosophical Essays on Mind and Psychology*, MIT Press, Cambridge, 1981.

representarse mostrando cómo cada una responde a un par de preguntas (véase el cuadro XVI.2).

Dije anteriormente que los teóricos de la identidad pretendían haber propuesto una tesis empírica sobre la naturaleza de la mente. ¿Pero es el funcionalismo una propuesta empírica? Aquí nos encontramos con dos estilos de argumentación diferentes. A veces los funcionalistas parecen pensar que su terminología demuestra la falsedad de la teoría de la identidad. Sin descartar esta tendencia apriorística del funcionalismo, yo prefiero la versión de su teoría que propone una tesis empírica. Es una cuestión empírica el hecho de que existan muchas maneras de construir físicamente una cosa pensante. Si la cantidad fuera enormemente grande, entonces la crítica funcionalista de la teoría de la identidad sería certera. Si la cantidad fuera mínima (incluso una), entonces la teoría de la identidad sería correcta. Acaso las restricciones de diseño impuestas por la psicología sólo se pueden satisfacer dentro de una gama muy estrecha de sistemas físicos; acaso las restricciones son tan severas que esta gama se reduce a un solo tipo de sistema físico. Esta idea no puede descartarse de buenas a primeras.

Si a los filósofos en esa misma época les hubiera interesado el problema de la vida tanto como les interesó el problema de la mente, habrían podido formular analogías biológicas de la teoría de la identidad y del funcionalismo. Sin embargo, no era necesario inventar una analogía biológica del dualismo mente/cuerpo —ya existía en la forma del vitalismo. Los dualistas afirman que los seres con mente poseen un ingrediente inmaterial. Los vitalistas afirman que los entes vivos poseen una sustancia inmaterial —un *élan vital*— que los hace distintos a los objetos inanimados.

Si el problema de la vida recapitulara el problema de la mente, entonces los triunfos de la biología molecular podrían haberse interpretado como evidencias de una teoría de la identidad, según la cual toda propiedad biológica es idéntica a alguna propiedad física. Finalmente, la progresión podría haberse completado

CUADRO XVI.2. *Tres teorías de la mente*

	<i>Dualismo</i>	<i>¿Son mentales?</i>	<i>¿Son físicas?</i>
		<i>Funcionalismo</i>	<i>Teoría de la identidad</i>
Objetos	No	Sí	Sí
Propiedades	No	No	Sí

con una analogía del funcionalismo. Aunque todo ser viviente es un objeto material, sus propiedades biológicas no pueden identificarse con propiedades físicas.

En realidad, este concepto funcionalista ha sido adoptado por los biólogos, aunque no en el contexto de intentar recapitular el problema de la estructura de la mente/cuerpo. Así, Fisher⁸ dice que “la adecuación, aunque se mida con un método unificado, es cualitativamente diferente en cada organismo diferente”. Algunos filósofos de la biología recientes han indicado lo mismo, alegando que la adecuación de un organismo es el resultado de sus propiedades físicas, aun cuando la adecuación no sea en sí una propiedad física. ¿Qué tienen en común un grillo apto y una cebra apta? No una propiedad física, no más allá de las que tienen en común con un cazador de ratas humano, con una trampa de ratas hecha de madera y con una hecha de alambre. La adecuación es realizable de muchas maneras.

Hay muchas otras propiedades y procesos biológicamente interesantes que aparentemente poseen las mismas características. Muchos implican una abstracción de los detalles físicos. Por ejemplo, consideremos lo que según Lewontin⁹ es necesario para que una serie de objetos evolucionen mediante la selección natural. Una condición necesaria y suficiente es la variación hereditaria de la adecuación. La capacidad de los entes para permanecer vivos y procrear descendientes tiene que ser variable. Si un ente y sus descendientes se parecen entre sí, el sistema evolucionará: la frecuencia de las características más aptas aumentará y la frecuencia de las menos aptas decrecerá.

Este esqueleto abstracto deja abierta la cuestión de lo que son los entes que participan en un proceso de selección. Para Darwin, eran organismos dentro de una sola población. Para los teóricos de la selección grupal, los entes son grupos o especies o comunidades. Los entes también pueden ser gametos o hebras de ADN, como en el fenómeno de la deriva meiótica y del ADN basura.

Fuera de la jerarquía biológica, es muy posible que la frecuencia de los entes culturales cambie debido a que muestran una variación hereditaria en la adecuación. Si algunas ideas son más contagiosas que otras, pueden extenderse a través de la población de pensadores. Los modelos evolutivos de la ciencia explotan esta idea. Otro ejemplo es la teoría económica de las empresas que determina la prosperidad o la bancarrota de las empresas con base en su eficiencia.

No hay que buscar muy lejos otros ejemplos de propiedades biológicas que son realizables de muchas maneras. Las teorías de los depredadores/presas, por

⁸ R. Fisher, *The Genetical Theory of Natural Selection*, Dover, Nueva York, 1958.

⁹ R. Lewontin, “The Units of Selection”, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1: 1-14, 1970.

ejemplo, obvian los detalles físicos que diferencian a los leones y los antílopes, de las arañas y las moscas.

Dije anteriormente que el funcionalismo de la filosofía de la mente debe verse como una tesis empírica sobre el grado en que las características psicológicas de un sistema restringen la realización física del sistema. Lo mismo se puede decir del funcionalismo como tesis sobre las propiedades biológicas. Podría parecer obvio que algunas propiedades biológicas —como la propiedad de ser un depredador— imponen pocas restricciones en las características físicas que un sistema deba poseer. Pero en otros casos, podría parecer mucho menos obvio.

Por ejemplo, consideremos el hecho de que el ADN y el ARN son estructuras mediante las cuales los organismos transmiten características de padres a hijos. Llamémoslas mecanismos hereditarios. Es una cuestión importante en la biología y la química el hecho de que otras moléculas puedan o no jugar el papel de un mecanismo hereditario. Acaso otros mecanismos físicos lo podrían hacer; acaso no. Esto no se puede juzgar *a priori*, sino que requiere un argumento científico real.

SI LAS PROPIEDADES PSICOLÓGICAS NO SON FÍSICAS, ¿ENTONCES QUÉ SON?

Al discutir la crítica funcionalista de la teoría de la identidad de la mente/cuerpo, hice hincapié sobre todo en la tesis negativa del funcionalismo. Ésta plantea lo que los estados psicológicos no son; no son físicos. Pero esto deja sin someter a prueba la propuesta positiva del funcionalismo. Si las propiedades psicológicas no son físicas, ¿entonces qué son?

Los funcionalistas han elaborado diversas respuestas a esta pregunta. Una consiste en que los estados psicológicos son computacionales y representativos. Claro es, el interés y la verosimilitud de esta tesis depende del significado que se le dé a “computacionales” y “representativos”. Si una teoría funcionalista supone que las calculadoras de bolsillo y las células fotoeléctricas tienen una idea del mundo, presumiblemente interpreta de manera muy permisiva este concepto. Por otra parte, si la crítica funcionalista de la teoría de la identidad es correcta, entonces nosotros no debemos pensar que un sistema tiene que ser físicamente como nosotros para que pueda poseer una cierta psicología. En otras palabras, el problema consiste en construir una teoría positiva que evite, como Ned Block¹⁰

¹⁰ N. Block, “Troubles with Functionalism”, en W. Savage (comp.), *Perception and Cognition: Issues in the Foundations of Psychology*, University of Minnesota Press, Mineápolis, 1975, pp. 231-236.

dice, tanto el chovinismo como el liberalismo. Las teorías chovinistas son demasiado estrechas, mientras que las teorías liberales demasiado amplias en sus propuestas de cómo hay que entender el dominio de la psicología.

EL CONDUCTISMO Y LA PRUEBA DE TURING

Los funcionalistas afirman que las teorías psicológicas pueden formularse haciendo abstracción de los detalles físicos que distinguen un sistema pensante de otro sistema pensante. La cuestión es: ¿cuánta abstracción se puede permitir?

Una propuesta radical es que un sistema posee mente, sin que importe lo que pasa dentro de él, cuando su conducta es idéntica a la de otro sistema que obviamente posee mente. Ésta es la idea general en que se basa la prueba de Turing. Los seres humanos tienen mente, y por lo tanto una máquina también cuando su conducta es idéntica a la conducta humana. Al elaborar esta idea, Turing se cuidó de que los indicios “irrelevantes” no nos previnieran en contra. Las computadoras no se parecen físicamente a las personas, pero para Turing esto era irrelevante en relación con que si pueden pensar o no. Para obviar este detalle estorbo, Turing exige que la máquina se coloque detrás de una pantalla y que su conducta se estandarice. La conducta debe consistir en los mensajes impresos en una cinta.

Aparte de ignorar intencionalmente el hecho de que las computadoras no se parecen a las personas, este procedimiento también supone que pensar es muy diferente de hacer. Si la inteligencia requiere la manipulación de objetos físicos en el entorno, entonces la noción de la conducta que se desarrolla en la prueba de Turing es muy exigua. Turing piensa que la inteligencia es una propiedad de la reflexión pura, por así decirlo. La conducta que se limita a la comunicación verbal es suficiente.

Así, la prueba de Turing representa una posible solución al problema del funcionalismo. Además de no requerir una estructura física como la que nuestro cerebro posee, para el pensamiento no existe ninguna restricción interna de ningún tipo que se pueda especificar individualmente. El único requisito es de carácter externo, especificado por el juego de la imitación.

La mayoría de los funcionalistas piensan que esta prueba es muy tosca. Desgraciadamente, es vulnerable a los errores del tipo-1 tanto como a los del tipo-2. Es decir, mediante este procedimiento se puede considerar erróneamente que una cosa que no piensa tiene mente, y que una cosa que piensa carece de mente (véase el cuadro XVI.3).

CUADRO XVI.3. *Errores de la prueba de Turing*

	<i>El sujeto piensa</i>	<i>El sujeto no piensa</i>
El sujeto pasa la prueba	correcto	tipo-1
El sujeto no pasa la prueba	tipo-2	correcto

En las discusiones sobre la IA, no se han examinado los errores del tipo-2. Sin embargo, parece claro que los seres humanos que tienen mente pueden imitar la conducta de computadoras que no tienen mente, y por lo tanto confundir al interrogador, quien pensará que no tienen mente. Es acaso más preocupante la posibilidad de que una máquina pudiera tener mente, pero con ideas y deseos tan diferentes de los de cualquier ser humano, que los interrogadores rápidamente se dieran cuenta de que no se dirigían a un ser humano. La máquina no pasaría la prueba de Turing porque no podría imitar los patrones de respuesta humanos; sería otra cuestión concluir que, por lo tanto, la máquina carecería de mente.

La posibilidad de un error de tipo-2, aunque real, no se ha enfocado. Más bien, a fin de superar la presunción de que las máquinas no pueden pensar, a los investigadores de la IA les ha interesado sobre todo construir dispositivos que pasen la prueba de Turing. Esto plantea la cuestión de si la prueba es vulnerable a los errores de tipo-1.

Ned Block¹¹ menciona un caso que muestra la posibilidad del error de tipo-1. Supongamos que pudiéramos dibujar un diagrama de árbol que contuviera todas las conversaciones posibles de cinco horas o menos de duración. Podríamos recortar este árbol registrando solamente lo que un encuestado “inteligente” pudiera responderle a un encuestador, sin tomar en cuenta el hecho de que el encuestador fuera o no “inteligente”. Tal estructura sería enorme, más grande de lo que una computadora actual pudiera ser capaz de almacenar. Pero ignoremos esta limitación y supongamos que introducimos este árbol estructural en una computadora.

Con base en esta estructura, una computadora podría interactuar con su encuestador exactamente como lo haría un ser humano inteligente. Pero el hecho de que la máquina simplemente se basa en este árbol estructural supone sin lugar a dudas que la máquina no posee en absoluto estados mentales.

Se podría objetar que la máquina pudiera programarse para reprobar la prueba de Turing si la conversación pasara de cinco horas. Esto es cierto, pero ahora

¹¹ N. Block, “Psychologism and Behaviorism”, *Philosophical Review*, 90: 5-43, 1981.

supongamos que se aumenta la dimensión del árbol, de manera que pueda abarcar todas las conversaciones sensatas con 10 horas o menos de duración. En principio, el límite de tiempo para el árbol podría fijarse en cualquier cantidad finita —digamos, 90 años—.

Block concluye que la prueba de Turing no capta cabalmente el pensamiento. El defecto de esta estructura ramificada no está en los comportamientos que produce, sino en cómo los produce. La inteligencia no sólo consiste en la habilidad para responder a preguntas de la misma manera que lo haría un ser humano. Calificar un comportamiento de “inteligente” equivale a comentar la forma en que se produce. Block concluye correctamente, pienso yo, que la prueba de Turing es excesivamente conductista.

Al decir esto, yo no estoy negando que la prueba de Turing sea útil. Obviamente, la evidencia conductista puede ser reveladora. Si uno quisiera detectar en qué consisten los puntos flacos de una simulación, uno podría tratar de descubrir cuáles *outputs* representan una mímica y cuáles no. Pero una cosa es que la prueba de Turing proporcione evidencias falibles de la inteligencia y otra cosa muy diferente que defina lo que significa tener mente.

Buena parte del acierto del muy discutido trabajo de Searle,¹² “Mentes, cerebros y programas” se limita a este mismo punto. En el ejemplo del cuarto chino que Searle propone, una persona que no habla la lengua china entra en un cuarto donde se le da un manual. En todas las páginas del manual hay una historia escrita en chino (S) y una pregunta en chino sobre esa historia (Q) que se corresponde con una respuesta en chino sobre esa historia (A). Es decir, la persona en el cuarto tiene una serie de reglas, todas con la forma de

$$S + Q \rightarrow A.$$

Se envían historias chinas al cuarto junto con las preguntas sobre las historias, también escritas en chino. La persona en el cuarto encuentra la pareja S + Q en su lista, anota la respuesta que se corresponde con la pareja, y envía la respuesta. El *input/output* del cuarto es precisamente lo que se podría esperar de alguien que entendiera las historias chinas y deseara proporcionar respuestas inteligentes (en chino) a las preguntas sobre las historias. Aunque el sistema pasaría la prueba de Turing, Searle concluye que el sistema que ejecuta este comportamiento no entiende nada de chino.

¹² J. Searle, “Minds, Brains, and Programs”, *Behavior and Brain Sciences*, 3: 417-457, 1980.

Searle no especifica exactamente cómo la persona en el cuarto recibe un *input* y produce un *output*. Son bastante vagos los detalles respecto al manual de respuestas. Pero el ejemplo de Block sugiere que es éste el punto importante. Si el programa tan sólo es un acoplamiento forzoso de historias y preguntas, por un lado, y de respuestas, por el otro, nada nos hace pensar que la ejecución del programa se relacione con la comprensión del chino. Pero nuestro veredicto podría cambiar si las respuestas del manual se parecieran a las que producen las personas que conocen el chino al responder a preguntas sobre historias. La comprensión no se puede definir con base en la habilidad de responder a preguntas; además, la forma en que se obtienen las respuestas debe tomarse en cuenta.

Searle considera una elaboración de esta sugerencia en una parte de su trabajo “La respuesta del simulador de cerebro (Berkeley y MIT)”.¹³ Supongamos que simulamos “la secuencia real de disparos de neuronas en las sinapsis del cerebro de una persona cuya lengua natal es el chino cuando escucha las historias en chino y da respuestas sobre las historias”. Un sistema construido de esta manera no sólo replicaría los pares de estímulos/respuestas que daría alguien que entendiera el chino; tal sistema también replicaría en gran medida los procesos internos que intervienen en los *inputs/outputs* del chino hablante.

Creo que la respuesta de Searle a esta objeción es cuestionable. Él dice que “el problema con el simulador de cerebro es que simula cosas del cerebro que no debería simular. Al simular solamente la estructura formal de la secuencia de disparos de neuronas en las sinapsis, no habrá simulado lo que es importante en el cerebro, a saber, sus propiedades causales, su capacidad para producir estados intencionales”.

Aunque este argumento de Searle casi no tiene peso, es importante reconocer que el rechazo de su tesis no es en absoluto trivial. Podría ser cierto o no la conjetura de que los estados de encendido/apagado de una neurona, además de su red de conexiones con otras neuronas, constituye todo lo que puede ser relevante sobre su capacidad para formar sistemas intencionales. Esta lista de las propiedades neuronales es muy exigua, por lo que la conjetura de que es suficiente para algunas características psicológicas es una conjetura exagerada. Las neuronas poseen muchas otras características; la afirmación de que todas son irrelevantes en lo que concierne a la psicología puede ser o no ser verdad.

En otro sentido el argumento de Searle reconoce algo verdadero e importante, aunque malinterpretándolo, creo yo. La intencionalidad implica de manera

¹³ *Idem.*

crucial la relación de lo “correspondiente”; las ideas y los deseos se corresponden con cosas del mundo fuera de la mente. ¿En qué forma el estado de un organismo se corresponde finalmente con un objeto, en vez de otro? ¿Cómo se explica que algunos estados son intencionales y otros no? Una posibilidad filosófica real es que la intencionalidad implica una conexión causal entre el mundo y el organismo. Para decirlo de manera burda, la razón por la cual mi vocablo “gato” se refiere a los gatos es que los gatos reales se relacionan con mi utilización de este vocablo en alguna forma causal específica. La explicación de la vía causal ha sido una tarea difícil para la teoría causal de la referencia. Pero dejando esto de lado, la afirmación de que sea necesario algún tipo de relación causal, aunque acaso no sea suficiente, por lo menos para algunos de los conceptos que poseemos, es hasta cierto punto verosímil.

Si esta relación mundo/mente es crucial para la intencionalidad, entonces resulta claro por qué la manipulación formal de los símbolos no puede, por sí misma, ser suficiente para la intencionalidad. Tal manipulación formal es puramente interna en el sistema, pero parte de lo que le permite a un sistema poseer intencionalidad involucra la forma en que el sistema y sus estados se relacionan con el mundo fuera del sistema.

Aunque la aceptación de este punto podría entrar en conflicto con algunos de los planteamientos de los partidarios de la IA fuerte, no implica que un ente pensante deba estar hecho de materia neuronal. La posibilidad de que una computadora de chips de silicio colocada en un medio ambiente pueda adquirir estados intencionales mediante sus interacciones con éste, se corresponde con la idea de que la intencionalidad requiere una conexión causal específica con el mundo externo.

No se sabe cómo debería ser este proceso de adquisición, para que el sistema termine por ser intencional. Pero esta duda no se relaciona específicamente con la cuestión de si las computadoras pueden pensar; también se aplica a la naturaleza de la intencionalidad humana. Supongamos que los seres humanos adquieren los conceptos, como por ejemplo los de *gato* y *casa*; es decir, supongamos que estos conceptos no son innatos. Supongamos todavía que las personas adquieren estos conceptos mediante la interacción causal con los gatos y las casas verdaderos. Para mí la cuestión es si los seres humanos pueden adquirir estos conceptos mediante un implante neural que se realizara cuando nacieran y que reordenara adecuadamente su cerebro. Una persona con un implante crecería y vería el mundo en la misma forma que cualquiera de nosotros que hubiera adquirido los conceptos normalmente. Si las intervenciones artificiales en los cerebros humanos

pueden proporcionarle la intencionalidad a ciertos estados, es difícil ver por qué las intervenciones artificiales en las computadoras de silicio no pudieran lograr lo mismo también.

He intentado extraer dos enseñanzas del argumento de Searle. Primero, existe la idea de que la prueba de Turing es excesivamente conductista. La habilidad para imitar la conducta inteligente no es suficiente para tener inteligencia. Segundo, la idea de que la intencionalidad —la correspondencia— puede involucrar algún tipo específico de relación mundo/mente. Si esto es cierto, entonces el hecho de que una máquina (o cerebro) ejecute un cierto programa, no es suficiente para que posea intencionalidad. Ninguna de estas conclusiones demuestra que las computadoras de silicio no puedan poseer mente.

¿Cuál es la importancia de estas cuestiones para el programa de investigaciones de la vida artificial? ¿Pueden definirse solamente sobre la base de los acoplamientos medio ambiente/conducta las propiedades biológicas de un organismo? Si una propiedad biológica posee esta característica, la prueba de Turing funcionará mejor en su caso que en el caso de la propiedad psicológica que Turing pretendía explicar. Consideremos la fotosíntesis como un ejemplo de un proceso biológico. Es cierto que un sistema experimenta la fotosíntesis si puede captar la energía del Sol para convertir el agua y el CO_2 en compuestos orgánicos elementales (principalmente CH_2O). Las plantas (usualmente) hacen esto en sus cloroplastos, pero ésta es tan sólo una forma de hacerlo. Si esto es cierto, ya sea en el caso de la fotosíntesis o en el de otras propiedades biológicas, entonces la primera enseñanza que extraje de la prueba de Turing en el contexto de la filosofía de la mente puede realmente indicar una disimilitud entre la IA y la VA. El conductismo representa un error en la psicología, pero puede proporcionar la manera correcta de considerar muchas propiedades biológicas.

La segunda enseñanza que extraje del argumento de Searle concierne a la intencionalidad como una relación entre un estado mental y una cosa que se encuentra fuera de él. Es una relación de correspondencia. Yo alegaba que la ejecución de un programa no puede ser la respuesta total a la cuestión de lo que representa la intencionalidad.

Muchas propiedades y procesos biológicos involucran la relación entre un organismo (o una parte de un organismo) y una cosa externa. Un organismo se reproduce cuando crea un descendiente. Una planta hace la fotosíntesis cuando se relaciona apropiadamente con una fuente de luz. Un depredador se come a otros organismos. Aunque una computadora podría replicar ciertos aspectos de los procesos que ocurren dentro del sistema respectivo, las computadoras no

se reproducen ni hacen la fotosíntesis ni comen, a menos que estén realmente relacionadas apropiadamente con las cosas externas. Estos procesos implican acciones-interacciones con el medio ambiente; los cálculos que ocurren dentro del cuerpo sólo representan una parte de la cuestión. Aquí, pues, existe una analogía entre la IA y la VA.

EL PELIGRO DE IR DEMASIADO LEJOS

El funcionalismo dice que se puede hacer abstracción de las propiedades psicológicas y biológicas en los detalles físicos relacionados con la forma en que esas propiedades se realizan. El problema principal del funcionalismo es determinar cuánta abstracción es permisible. Un peligro persistente para las teorías funcionalistas es la equivocación de ser demasiado liberales al respecto. Este peligro es especialmente amenazador cuando se confunde la estructura matemática de un proceso con su contenido empírico. Esta confusión puede llevarle a uno a decir que el sistema tiene mente o está vivo (o posee una constelación más específica de propiedades psicológicas o biológicas) cuando no la tiene y no lo está.

Un sencillo ejemplo de cómo se realiza esta falacia puede ser aleccionador. Consideremos la ley Hardy-Weinberg de la genética de las poblaciones. Esta ley determina las frecuencias que muestran los genotipos diploides en un locus cuando hay un apareamiento aleatorio, un número igual de machos y de hembras, y no hay una selección o una mutación. Es, por así decirlo, una “ley de fuerza nula” —describe lo que sucede en una población cuando no existen fuerzas evolutivas (véase Sober)—.¹⁴ Si p es la frecuencia del alelo A y q es la frecuencia de a (donde $p + q = 1$), entonces en las circunstancias descritas las frecuencias de AA , Aa y aa son p^2 , $2pq$ y q^2 , respectivamente.

Consideremos otra realización física del sencillo concepto matemático que se involucra en la ley Hardy-Weinberg. Un fabricante de zapatos produce zapatos pardos y zapatos negros. Accidentalmente, la cadena de producción no ha mantenido juntos los pares de zapatos, sino que ha amontonado los zapatos del pie izquierdo en una pila y los zapatos del pie derecho en otra. El fabricante de zapatos desea saber cuál será el resultado si una máquina aleatoriamente selecciona zapatos de las dos pilas y conjunta pares de zapatos. Si p es la frecuencia de los zapatos negros y q es la frecuencia de los zapatos pardos en cada pila, entonces la

¹⁴ E. Sober, *The Nature of Selection*, MIT Press, Cambridge, 1984.

frecuencia esperada de los tres pares posibles será p^2 , $2pq$ y q^2 . Se podrían dar muchos ejemplos matemáticos de este tipo.

Supongamos que aplicáramos la ley Hardy-Weinberg a una población de *Drosophila*. Estas mosquitas de la fruta son entes biológicos; están vivas y la ley Hardy-Weinberg determina un aspecto importante de su manera de reproducirse. Como hemos visto, la misma estructura matemática se puede aplicar a los zapatos. Pero los zapatos no son entes vivientes; el proceso mediante el cual la máquina conjunta pares mediante una selección aleatoria no es un proceso biológico.

Ahora quiero exponer cierta terminología: la falacia Zapatos/Moscas de la Fruta es el elemento erróneo del razonamiento incorporado en el siguiente argumento:

Las moscas están vivas.
Las moscas se describen por la ley L.
Los zapatos se describen por la ley L.
Por lo tanto, los zapatos están vivos.

Una variante de este argumento enfoca una propiedad biológica específica —como la reproducción— más que la propiedad genérica de “estar vivo”.

Las teorías funcionalistas excluyen los detalles físicos. Van demasiado lejos confundiendo la forma matemática con el objeto biológico (o psicológico) —cuando caen en la falacia Zapato/Mosca—. El resultado es una concepción de la vida (o de la mente) excesivamente liberal.

La falacia del Zapato/Mosca es un útil correctivo contra las afirmaciones aventuradas de que un sistema en particular pueda estar vivo o mostrar una cierta gama de características biológicas. Si uno siente la tentación de hacer tales afirmaciones, entonces debería intentar describir un sistema que posea las características formales correspondientes a un sistema viviente, pero que sin duda no está vivo. La práctica popperiana de intentar realizar una falsificación resulta útil al respecto.

Consideremos, por ejemplo, el reciente fenómeno de los virus computacionales. ¿Están vivos? Estos entes cibernéticos pueden invadir una computadora huésped y apoderarse de parte de su memoria. También se pueden “reproducir” y experimentar una “mutación”. ¿Son meras metáforas, o debemos concluir que los virus computacionales están vivos?

Utilizando la idea de la falacia Zapato/Mosca para ayudarnos a responder a esta pregunta, consideremos otro sistema similar no viviente. Consideremos una

cadena de cartas exitosa. A causa de sus características, es atrayente para sus “huéspedes” (es decir, los individuos que las reciben). Estos huéspedes luego hacen copias de las cartas y las envían a otros individuos. Ocurren errores en las copias, de manera que las cartas experimentan la mutación.

Yo no veo ninguna razón para decir que las cartas están vivas. Más bien, se relacionan con los individuos huéspedes en tal forma que cada vez más copias de las cartas se producen. Si los virus computacionales no hacen algo más que las cartas, entonces los virus computacionales tampoco están vivos.

Obsérvese el “si” en la frase anterior. Yo no asevero que los virus computacionales, o cualquier cosa parecida a ellos, no puedan estar vivos. Más bien, yo digo que la falacia Zapato/Mosca proporciona un formato conveniente para abordar tales cuestiones en una forma adecuadamente escéptica y popperiana.

DE LA COGNICIÓN HUMANA A LA VIDA ARTIFICIAL; DE LA BIOLOGÍA A LA VIDA ARTIFICIAL

Uno de los muy atractivos aspectos de la va es que saca provecho de una tesis independiente y verosímil sobre la psicología humana. Un programa de investigaciones fructífero sobre la cognición humana debe basarse en la idea de que la cognición involucra manipulaciones computacionales de las representaciones. Acaso algunas representaciones obtienen su intencionalidad mediante una conexión entre la mente y el mundo. Al establecerse, estas representaciones dan origen a otras representaciones mediante procesos que explotan las propiedades formales (internas) de las representaciones. En la medida en que las computadoras puedan formar y manipular las representaciones, en esa medida también pueden poseer estados cognitivos.

Claro es, dispositivos mecánicos muy sencillos dan forma y manipulan a las representaciones. Los indicadores del nivel de gasolina en los automóviles y los termostatos son ejemplos de tales dispositivos, pero sería totalmente erróneo decir que piensan. Acaso la práctica computacional podrá explicar por qué esto es así, al especificar más detalladamente cuáles son los tipos de representaciones y cuáles las manipulaciones computacionales que son necesarias en la cognición.

¿Se puede decir lo mismo en relación con el programa de investigaciones de la vida artificial? ¿Será posible justificar la idea de que los procesos biológicos en los organismos naturales involucran la formación y la manipulación de las representaciones? Si este punto puede establecerse en el caso de los organismos natu-

rales, entonces en la medida en que las computadoras puedan formar y manipular las representaciones correctamente, en esa medida también podrá parecer factible el programa de investigaciones de la VA.

Claro, la psicología humana y animal es parte de la biología humana y animal. Es una verdad trivial que algunas propiedades biológicas involucran la formación y la manipulación de las representaciones. Pero esto sólo le permite a la VA no ser más que VA. Por lo tanto el problema debe consistir en si hay o no procesos vitales, aparte de los psicológicos, que involucren computaciones con base en las representaciones.

En el caso de algunos procesos biológicos, parece admisible la idea de que impliquen esencialmente la formación y la manipulación de las representaciones. Gracias a nuestro conocimiento del ADN, podemos ver la ontogénesis y la reproducción como procesos que implican representaciones. Es natural ver el genoma de un organismo como una serie de instrucciones para construir el fenotipo del organismo. Esta idea es más admisible cuando los aspectos fenotípicos son relativamente invariables ante los cambios en el medio ambiente. La idea de que el genoma representa al fenotipo no debe contradecir el hecho de que los fenotipos son el resultado de una interacción gen/medio ambiente. Del mismo modo, los planos de los edificios no determinan el carácter de un edificio en todos sus detalles. Los materiales para la construcción del edificio que se encuentren en el medio ambiente y las habilidades de los trabajadores que lo construyen también cumplen una función. Pero esto no nos impide pensar que el plano sea una serie de instrucciones.

Al convenir en que las computadoras podrían poseer características biológicas, tales como el desarrollo y la reproducción, no estoy admitiendo que actualmente las posean. En particular, las computadoras que meramente manipulan teorías sobre el crecimiento y la reproducción no participan ellas mismas en estos procesos. Nuevamente, el meollo de la cuestión es que la descripción de un puente no es un puente.

¿Y qué de otras propiedades biológicas y de otros procesos biológicos? ¿Son esencialmente computacionales? ¿Y qué de la digestión? ¿Involucra ésta la formación y la manipulación de las representaciones? Es posible alegar que no. La digestión degrada las partículas de los alimentos; su función consiste en extraer del medio ambiente la energía que el sistema pueda utilizar. El proceso digestivo, *per se*, no es computacional.

Lo anterior no niega que en algunos sistemas los procesos computacionales puedan influir en la digestión. El mal humor en los seres humanos puede causar

la indigestión. Si entendemos los estados mentales computacionalmente, entonces los procesos computacionales en algunos casos pueden influir en la digestión. Pero tales efectos vendrían del exterior. Este ejemplo no debilita la afirmación de que la digestión misma no es un proceso computacional.

Aunque yo puedo admitir que esta afirmación respecto a la digestión puede ser errónea, es importante que no se refute trivializando los conceptos de la representación y la computación. La digestión funciona mediante la degradación de las partículas de los alimentos, convirtiéndolas en diversos componentes. Podemos describir el proceso como una serie de procedimientos realizados por el sistema digestivo. ¿No estamos a un paso, pues, de describir el sistema digestivo como la ejecución de un programa? Puesto que el programa es una representación, al describirlo así, ¿no proponemos una teoría computacional de la digestión?

A fin de ver el error en este argumento, necesitamos emplear la distinción que Kant alguna vez estableció respecto a un caso muy diferente al nuestro. Es la distinción entre obedecer una regla y actuar conforme a una regla. Cuando un sistema obedece a una regla, la relaciona con una representación; el carácter de esta representación guía el comportamiento del sistema. Por otra parte, cuando un sistema actúa de conformidad con una regla, no la relaciona con una representación; más bien, simplemente actúa como si hubiera relacionado la representación con la regla.

Los planetas giran describiendo elipses en torno al sol. ¿Obedecen a una regla o simplemente actúan de acuerdo con una regla? Sin duda, esto último. Su comportamiento no se guía por ninguna representación. Por esta razón no es posible proponer una teoría computacional del movimiento de los planetas sin trivializar los conceptos de la computación y la representación. Yo pienso que lo mismo puede ser verdad en muchos procesos biológicos; acaso la digestión sea un ejemplo convincente.

Al decir que la digestión no es un proceso computacional, no alego que las computadoras no pueden digerir. El movimiento de los planetas no es un proceso computacional, pero esto no significa que las computadoras no puedan describir órbitas elípticas. Las computadoras pueden hacer muchas cosas que no tienen nada que ver con el hecho de que sean computadoras. Pueden servir como los topes de una puerta. Acaso algunas puedan digerir alimentos. Pero esto nada tiene que ver con el hecho de que un modelo computacional de la digestión sea correcto o no.

He enfocado varios procesos biológicos, preguntando si las computadoras pueden causarlos o participar en ellos. Pero consideremos la pregunta principal: ¿pueden estar vivas las computadoras? Si la pregunta de Turing consistía en si las

computadoras pueden pensar, ¿no debería enfocar la pregunta paralela la cuestión de qué es estar vivo, más que enfocar conceptos más sutiles como la reproducción, el crecimiento, la selección y la digestión?

He dejado para el final esta pregunta porque es la más vaga. El problema es que la biología al parecer poco tiene que decirnos sobre la cuestión de qué es estar vivo. Esto no niega que existan muchos conocimientos detallados sobre los diversos sistemas vivientes. Pero es difícil determinar cuáles son las teorías biológicas que nos revelan realmente la naturaleza de la vida. No nos dejemos confundir por el hecho de que la biología mucho tiene que decir sobre las características de la vida terráquea. El punto es que no existe una respuesta razonada a la pregunta sobre cuáles serían los aspectos de la vida terráquea que son necesarios para estar vivo, y cuáles los aspectos que son accidentales.

En realidad, la situación no es demasiado diferente en la ciencia cognitiva. Los psicólogos y otros científicos mucho saben sobre este o aquel proceso psicológico. Pueden proporcionar datos sobre los procesos psicológicos de muchos sistemas en particular. Pero los psicólogos no parecen plantearse la pregunta “¿cuál es la naturaleza de la mente?”, entendida de una manera adecuada, no chovinista.

Acaso piensen ustedes que éstas son preguntas que un filósofo debería ser capaz de contestar. Si las ciencias ignoran este tipo de preguntas tan generales, entonces es el deber de la filosofía responder a ellas. Yo soy un escéptico al respecto. Aunque los filósofos pueden ayudar a esclarecer las implicaciones de varias teorías científicas, realmente dudo que sea posible una respuesta puramente filosófica a estas preguntas. Si las respectivas ciencias no se las plantean, creo que no hay nada que hacer.

Por otro lado, no veo que importe mucho. Siendo posible construir una máquina que integre ciertas propiedades y ciertos procesos de tipo biológico, ¿qué interés tiene determinar si está o no viva? Esta pregunta no le debería preocupar a la VA, y la pregunta paralela tampoco debería ser un problema para la IA. Si una máquina puede percibir, recordar, desear y pensar, ¿qué más se puede decir sobre la cuestión de si posee mente o no? Si una máquina puede extraer energía del medio ambiente, crecer, reparar los daños que sufre y reproducirse, ¿qué más se puede decir sobre la cuestión de si está o no “realmente” viva?

Nuevamente, es importante no perder de vista los “si” de las dos frases anteriores. No estoy diciendo que no es importante preguntar en qué consiste la naturaleza de la mente o la naturaleza de la vida. Más bien, lo que propongo es que estas preguntas generales sean planteadas mediante un mayor enfoque en las propie-

dades psicológicas y biológicas específicas. Creo que con esta estrategia las preguntas generales serán más verosímiles; por añadidura, para mí las preguntas de tipo general pierden mucho de su interés una vez que se ha podido responder a las preguntas específicas.

COMENTARIOS FINALES

El funcionalismo, tanto en el estudio de la mente como en el estudio de la vida, es una doctrina liberadora. Nos lleva a ver la cognición humana y los organismos terráqueos como ejemplos de la mente y de la vida. Para comprender la mente y la vida, tenemos que distanciarnos de los detalles físicos. El problema consiste en hacerlo sin ir demasiado lejos.

Una de las ventajas de la VA respecto a la IA es que la vida terráquea se conoce mucho mejor que la mente humana. El teórico de la VA con frecuencia puede explotar conocimientos bastante detallados sobre la forma en que los procesos de la vida se implementan en los organismos naturales; aunque la meta sea generalizar sin tomar en cuenta estos ejemplos, el conocimiento real de los casos básicos puede significar una gran ventaja teórica. Los teóricos de la IA no suelen ser tan afortunados. No se entiende en absoluto qué es la cognición humana, de manera que la meta de proponer una teoría (más) general de la inteligencia no puede explotar el conocimiento detallado de los casos básicos.

Un corolario inmediato de la tesis funcionalista de la realización múltiple es que los problemas biológicos y psicológicos no se resuelven mediante la consideración de las teorías físicas. La mecánica cuántica actual no es la solución, pero los fenómenos biológicos y psicológicos tampoco demuestran que sea inadecuada cualquier teoría física actual. El funcionalismo separa la física de las ciencias especiales. Esto no significa que el funcionalismo represente la posición correcta que haya que asumir en relación con todos y cada uno de los problemas biológicos; acaso algunos problemas biológicos sean problemas físicos disimulados. Es decir, que si uno es funcionalista respecto a cualquier proceso biológico, no debe buscar en la física una gran ayuda teórica.

La prueba de Turing incorpora un criterio conductista de la adecuación. No es un criterio válido para las características psicológicas, aunque es posible que lo sea para diversas características biológicas. Sin embargo, en relación con virtualmente todos los procesos biológicos, las conductas requeridas deben ser muy diferentes de los *outputs* impresos en una cinta. Una computadora de escritorio que utiliza un programa de preguntas/respuestas no se reproduce, ni se desarrolla, ni

evoluciona, ni digiere. No hace ninguna de estas cosas, aun cuando el programa describa los procesos de la reproducción, desarrollo, evolución, o digestión.

A veces se dice que cuando una simulación computacional es lo suficientemente detallada, entonces es válido pensar que la computadora es un ejemplo de los objetos y procesos que simula. Una simulación computacional de un puente puede verse como un puente cuando en el puente hay simulaciones de personas y cuando la simulación de un río corre debajo del puente. A estas alturas espero que sea obvio por qué para mí esta idea es errónea. El problema con las simulaciones computacionales no es que son representaciones simplificadas, sino que no dejan de ser representaciones. Incluso la descripción completa de un puente —exacta en todos sus detalles— seguiría siendo una cosa muy distinta a un puente real.

Acaso sea posible proporcionar un modelo computacional para cualquier cosa. Esto simplemente significa que sería posible codificar la descripción de su dinámica en algún lenguaje computacional. De esto no se deriva que todos los procesos son computacionales. La reproducción es un proceso computacional porque implica la transformación de las representaciones. La digestión no parece tener esta característica. El programa de investigaciones de la VA tiene mucho que ofrecer; no es necesario exagerar sus virtudes.

BIBLIOGRAFÍA

- Block, N., "Psychologism and Behaviorism", *Philosophical Review*, 90: 5-43, 1981.
- , "Troubles with Functionalism", en W. Savage (comp.), *Perception and Cognition: Issues in the Foundations of Psychology*, University of Minnesota Press, Mineápolis, 1975, pp. 231-236.
- Dennett, D. C., *Brainstorms: Philosophical Essays on Mind and Psychology*, MIT Press, Cambridge, 1981.
- Dresket, F., "Machines and Mental", *Proceedings and Adresses of the American Philosophical Associations*, 5: 23-33, 1985.
- Fisher, R., *The Genetical Theory of Natural Selection*, Dover, Nueva York, 1958.
- Fodor, J. A., *Psychological Explanation: An Introduction to the Philosophy of Psychology*, Random House, Nueva York, 1968. [Versión en español: *La explicación psicológica: introducción a la filosofía de la psicología*, trad. de José García Albea, Cátedra, Madrid, 1980.]

- Lewontin, R., "The Units of Selection", *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1: 1-14, 1970.
- Pattee, H. H., "Simulations, Realizations, and Theories of Life", en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, Redwood City, 1989, pp. 63-77.
- Place, U. T., "Is Consciousness a Brain Process?", *British Journal of Psychology*, 47: 44-50, 1956.
- Putman, H., "The Nature of Mental States", en H. Putman, *Mind, Language, and Reality*, Cambridge University Press, Cambridge, 1975.
- Ryle, G., *The Concept of Mind*, Barnes & Noble Inc., Nueva York, 1949. [Versión en español: *El concepto de lo mental*, trad. de Eduardo Rabossi, Paidós, Barcelona, 2005.]
- Searle, J., "Minds, Brains, and Programs", en *Behavior and Brain Sciences*, 3: 417-457, 1980.
- Smart, J. J. C., "Sensations and Brain Processes", *Philosophical Review*, 68: 141-156, 1959.
- Sober, E., *The Nature of Selection*, MIT Press, Cambridge, 1984.
- , "Methodological Behaviorism, Evolution, and Game Theory", en J. Fetzer (comp.), *Sociobiology and Epistemology*, Reidel, Dordrecht, 1985, pp. 181-200.
- Wittgenstein, L., *Philosophical Investigations*, Basil Blackwell, Oxford, 1953. [Versión en español: *Investigaciones filosóficas*, trad. de Alfonso García Suárez y Ulises Moulines, UNAM, México, 1988.]

Marc Lange

XVII. LA VIDA, LA “VIDA ARTIFICIAL” Y LA EXPLICACIÓN CIENTÍFICA*

INTRODUCCIÓN

¿Qué significa para un ente ser una *cosa viviente*? En los últimos tiempos esta cuestión se ha tratado por los filósofos con benevolente negligencia. (No se menciona en absoluto en los textos actuales de filosofía o de biología.)¹ En cambio, hoy ciertos biólogos y científicos de la computación la discuten mucho, negando que sea artificial la distinción entre la vida y la no vida; desde su perspectiva, es un tema importante en la investigación científica. Estos biólogos y científicos se han organizado, creando un nuevo campo, la “vida artificial”, con sus propias conferencias,² su propia publicación,³ e incluso sus propias ediciones de divulgación.⁴

Los investigadores de ALife (vida artificial) creen que es posible crear y estudiar *organismos digitales*, los cuales consisten en programas lingüísticos digitales que *viven* en la memoria de la computadora. Cuando se ejecuta el programa, éste a veces se copia en otro lugar de la memoria. El programa puede hacer que su “copia” incluya nuevos elementos, permitiendo así que opere la variación y la selección. “Los organismos digitales evolutivos competirán entre sí para tener acceso a los limitados recursos del espacio de la memoria y del tiempo de la unidad central de proceso [CPU], y la evolución habrá de generar adaptaciones para un acceso más ágil y para una utilización más eficiente de estos recursos.”⁵ Aunque muchos

* Este capítulo apareció originalmente en *Philosophy of Science*, 63 (2): 225-244, 1996. © The University of Chicago Press.

¹ Por ejemplo, A. Rosenberg, *The Structure of Biological Science*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985; E. Sober, *Philosophy of Biology*, Westview, Boulder, 1993.

² Por ejemplo, C. G. Langton, “Artificial Life”, en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, Redwood City, 1989; C. G. Langton, “Introduction”, en C. G. Langton *et al.* (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1991.

³ El primer número de *Artificial Life* fue publicado por MIT Press en 1994.

⁴ Por ejemplo, S. Levy, *Artificial Life*, Vintage, Nueva York, 1992; C. Emmeche, *The Garden in the Machine: The Emerging Science of Artificial Life*, Princeton University Press, Princeton, 1994.

⁵ T. S. Ray, “An Evolutionary Approach to Synthetic Biology”, *Artificial Life*, 1: 185, 1994.

partidarios de la “vida artificial fuerte” sostienen (por motivos que luego expondré) que actualmente no existen entes de *software*, también alegan “que no es difícil imaginar virus computacionales del futuro que estarán tan vivos como los virus biológicos”⁶ y que ciertos tipos de patrones autorreplicadores de instrucciones también estarían vivos, no sólo como lo están los virus biológicos, sino en todo sentido. C. G. Langton, un prominente investigador de ALife, expone así un punto de vista común en el campo:

La meta última del campo de la vida artificial sería la de crear la “vida” en algún otro medio, idealmente un medio *virtual* donde la esencia de la vida se hubiera abstraído a partir de los detalles de su implementación en cualquier modelo en particular. Queremos construir modelos que sean tan semejantes a la vida como para que dejen de ser *modelos* de la vida y se conviertan en *ejemplos* de vida.⁷

Obviamente, cualquier afirmación de que ciertos segmentos autorreplicadores de un código máquina están vivos —no en un sentido metafórico sino en el sentido biológico literal— presupone que en la biología efectivamente *se utiliza* tal concepto de la vida. Pero no es obvio que sea necesaria en la biología la distinción entre la vida y la no vida. Además, cualquier alegación de que ciertos elementos del *software* están vivos, en el sentido biológico literal, presupone un concepto aproximado de lo que es la “vida”. Pero es notoriamente difícil explicar la “vitalidad”. Finalmente, el argumento de la vida artificial fuerte se enfrenta a las críticas (por ejemplo, de Elliot Sober)⁸ de que no sería posible que entes compuestos de *software* estuvieran vivos en el sentido biológico.

En este trabajo quiero examinar todas estas cuestiones en el contexto de la renovada discusión de la “vida” en la literatura científica. Intentaré comprender qué utilidad (si alguna) podría tener este concepto en la biología —especialmente en relación con las explicaciones científicas de ciertos fenómenos— y qué habrá de resultar (si algo) de los debates científicos sobre la utilidad de este concepto. Mi propósito no consiste en juzgar la validez de cualquiera de las teorías que se plantean respecto a la “vida artificial”. Más bien, consiste en investigar si el concepto de la “vitalidad” puede desempeñar una función en la reconstrucción racional de la biología, y (si así fuera) identificar cuál podría ser esa función. Oca-

⁶ J. D. Farmer y A. Belin, “Artificial Life: The Coming Evolution”, en C. G. Langton *et al.* (comps.), *Artificial Life II*, *op. cit.*, p. 820.

⁷ C. G. Langton, “Studying Artificial Life with Cellular Automata”, *Physica D*, 22: 147, 1986.

⁸ E. Sober, “Learning from Functionalism — Prospects for Strong Artificial Life”, en C. G. Langton *et al.* (comps.), *Artificial Life II*, *op. cit.*, pp. 749-765.

sionalmente, será útil tratar de entender la función que este concepto desempeña en el programa de investigaciones de la vida artificial. También será iluminador examinar algunos episodios en la historia de la biología donde el vitalismo no se involucró, pero donde los científicos, de todos modos, desarrollaron el concepto de la “vitalidad”. Asimismo será útil en algunas ocasiones la comparación de la “vida” con otros conceptos de la ciencia.

LOS “SIGNOS DE VIDA” Y CÓMO NO DEMOSTRAR
QUE EL CONCEPTO DE LA “VIDA” ES INNECESARIO EN LA BIOLOGÍA

¿En qué se basan los partidarios de la vida artificial fuerte para alegar que ciertos elementos autorreplicadores del código máquina estarían vivos? Langton resume el argumento así:

La Vida Artificial nos obligará a repensar en qué consiste “estar vivo”. El hecho es que no hemos llegado a un acuerdo común respecto a una definición del “estado viviente”. Cuando se les pide una definición, los biólogos con frecuencia señalan una larga lista de comportamientos y aspectos característicos que la mayoría de los entes vivientes tienen en común [...] Sin embargo, puesto que la mayoría de las listas de ese tipo se constituyen estrictamente por criterios relacionados con el comportamiento, es muy posible que pronto existan procesos computacionales que muestren todos los comportamientos que aparecen en una lista de ese tipo [...] Muchos investigadores en el campo de la Vida Artificial creen en la Afirmación Fuerte [...] de que cualquier definición o lista de criterios que sea lo suficientemente amplia como para abarcar toda la vida biológica conocida, también tendrá que incluir ciertos tipos de procesos computacionales, los cuales por lo tanto tendrán que considerarse como “realmente” vivos.⁹

En los atributos que usualmente mencionan los biólogos¹⁰ y los investigadores de ALife¹¹ como “signos de vida”, se encuentran las capacidades para la reproducción, el crecimiento, el movimiento, la evolución, la adaptación al medio ambiente, la estabilidad ante cambios menores del medio ambiente (la “homeostasis”) y la transformación de la materia y la energía del medio ambiente para su utiliza-

⁹ C. G. Langton, “Introduction”, en C. G. Langton *et al.* (comps.), *op cit.*, pp. 19-20.

¹⁰ Por ejemplo, N. W. Pirie, “The Meaninglessness of the Terms ‘Life’ and ‘Living’”, en J. Needham y D. E. Green (comps.), *Perspectives in Biochemistry*, Cambridge University Press, Cambridge, 1938, p. 14; H. Curtis, *Invitation to Biology*, Worth, Nueva York, 1977, pp. 14-15.

¹¹ Por ejemplo, J. D. Farmer y A. Belin, *op. cit.*, 1991, p. 18.

ción por las actividades organizativas del organismo (el “metabolismo”). Se han propuesto listas de este tipo desde hace mucho, pero su autoridad es dudosa, ya que siempre contienen ciertas salvedades o excepciones: por ejemplo, el hecho de que algunos entes no vivientes posean uno o más de los atributos mencionados; el hecho de que un ente pueda poseer todas las propiedades mencionadas y sin embargo no estar vivo, y el hecho de que algunos entes vivientes carezcan de algunas de las propiedades mencionadas. Existen ejemplos canónicos de lo anterior: un remolino o una ola incorporan en sí mismos el agua circundante; los cristales, las nubes y las llamas pueden crecer, mientras que muchos organismos no; el hierro se oxida al interactuar con el oxígeno de su entorno; las burbujas permanecen estables bajo diversos pequeños cambios ambientales; las mulas y los animales castrados no son capaces de reproducirse; la pepsina en el estómago cataliza la reacción que produce pepsina a partir del pepsinógeno; los bloques de madera laminada de Penrose¹² se reproducen; las llamas, las olas del mar y los planetas se mueven; etcétera.

Una forma de obviar la explicación de la relación de la vitalidad con los “signos de la vida” consiste en negar que los biólogos deban interesarse en cualquier propiedad que se encuentre más allá de la conjunción de estos signos. Dice Sober:

Si fuera posible construir una máquina [o, más bien, un segmento de un código máquina (ML)] que incluyera varios procesos y propiedades biológicos, ¿qué interés tendría entonces decir que estuviera o no viva? [...] Si una máquina [o un segmento de un código máquina (ML)] pudiera extraer energía de su medio ambiente, crecer, reparar los daños que sufre su cuerpo, y reproducirse, ¿qué más habría que decir sobre la cuestión de que estuviera o no “realmente” viva? [...] Yo no entiendo por qué las preguntas generales seguirían siendo pertinentes una vez que se hubiera dado respuesta a las más específicas.¹³

Algunos biólogos eminentes aparentemente están de acuerdo con Sober, aunque otros no. El inmunólogo P. B. Medawar, ganador del Premio Nobel en 1960, dice que las discusiones sobre lo que significa estar vivo “se consideran de bajo nivel en el discurso biológico”,¹⁴ mientras que el genético Joshua Lederberg, ganador del Premio Nobel en 1958, afirma:¹⁵ “Una meta importante de la biolo-

¹² L. S. Penrose, “Self-reproducing Machines”, *Scientific American*, 200 (6): 105-113, 1959.

¹³ E. Sober, “Learning from Functionalism — Prospects for Strong Artificial Life”, *op. cit.*, p. 763.

¹⁴ P. B. Medawar y J. S. Medawar, *The Life Science*, Harper & Row, Nueva York, 1977, p. 7.

¹⁵ J. Lederberg, “Exobiology: Approaches to Life beyond the Earth”, *Nature*, 132: 394, 1960.

gía teórica es una definición abstracta de la vida. Nuestro único acuerdo hasta la fecha es que tal definición tendría que ser arbitraria [puesto que] la vida ha evolucionado gradualmente desde la materia inanimada”.

El comentario de Lederberg nos recuerda que no se puede demostrar que la distinción entre la vida y la no vida sea superflua en la biología moderna simplemente señalando que los biólogos reconocen la existencia de un continuo entre los entes “vivientes” y los “no vivientes”, una región intermedia habitada, por ejemplo, por virus, priones y diversos entes que figuran en las teorías del “origen de la vida”. Muchos conceptos científicos importantes tienen demarcaciones vagas —incluso los diferentes elementos químicos, ejemplos paradigmáticos de las “categorías naturales”—. Aunque la diferencia entre el número atómico de 7 y el número atómico de 8 parece ser clara, ¿qué sucede cuando un átomo de nitrógeno absorbe una partícula alfa y se produce un protón? Como señala Sober en otra de sus obras,¹⁶ es muy posible que no se pueda determinar el momento exacto en que un átomo de nitrógeno se convierte en un átomo de oxígeno. Acaso no sea necesario especificar el momento exacto de la transmutación, de la misma manera que presumiblemente “no importa si un virus se describe como un organismo viviente o no viviente”.¹⁷ El hecho de que haya casos intermedios respecto a los cuales el concepto de “viviente” no sea útil, no demuestra que este concepto sea inútil en la biología, sino solamente que una adecuada reconstrucción racional del papel de la biología deberá incorporar tales casos.

Con frecuencia se dice que hoy los biólogos no pueden *definir* la vida. Sí, claro, saben lo que la palabra significa —por lo menos en el sentido ordinario que les permite usarla adecuadamente— y además existen las definiciones de los diccionarios. Hoy los biólogos no pueden definir la “vida”, pero solamente en el sentido en que no la han podido “definir de una vez por todas”; hoy no pueden reducir totalmente el concepto de la vitalidad a los conceptos de otras propiedades independientemente inteligibles. Esta incapacidad no significa que el concepto de la vida no sea útil en la biología. El concepto del “electrón” es útil en la física; se utiliza por los físicos, ellos saben lo que significa, ellos conocen algunas de las propiedades que el electrón posee, pero no pueden definir el “carácter del electrón” exclusivamente. Los filósofos de la naturaleza veían el “agua” como una categoría natural y sabían lo que era mucho antes de que supieran que el agua es H₂O y antes de que hubieran propuesto una definición reductora del “agua”.

¹⁶ E. Sober, “Evolution, Population Thinking, and Essentialism”, en M. Ereshefski (comp.), *The Units of Evolution*, MIT Press/Bradford Books, Cambridge, 1992, p. 353.

¹⁷ P. B. Medawar, y J. S. Medawar, *op. cit.*, p. 7; cf. N. W. Pirie, *op. cit.*, p. 22.

Además, la “vida” puede ser útil en la biología, y una de las grandes metas de la biología puede ser la *comprensión* de la vitalidad, sin que sea una de sus metas proponer una definición (en el sentido reductor) de la “vitalidad”, de la misma manera que no es una de sus metas definir “avestruz” y tampoco es una de las metas de la física definir el “electrón”. (En este sentido, para que la distinción entre la vida y la no vida sea útil en la ciencia, no es necesaria que la *comprensión* de la vitalidad sea una de sus *metas*. Es posible que la comprensión de la vitalidad sea valiosa, en cuanto medio, para la ciencia, no en cuanto un fin en sí mismo. Regresaré posteriormente a este punto.) Me parece curioso que los biólogos teóricos, siempre que mencionan el concepto de la “vida”, inmediatamente lo relacionan con varias posibles definiciones de la “vida”, deplorando su insuficiencia. No entiendo bien por qué los biólogos creen que su incapacidad para definir la “vida” reduce la veracidad de este concepto o limita su utilidad. Como ya dije (e ilustraré con otros ejemplos todavía), ésta no es la misma actitud que los científicos asumen en relación con otros conceptos.

Acaso a los biólogos les preocupe que utilizar el concepto de “vida” sin la posibilidad de definirlo reductoramente los obliga a asumir el vitalismo. Pero no debería ser necesario decir que a fin de que la distinción entre los entes vivos y los entes no vivos figure en nuestra reconstrucción racional de la investigación biológica, los científicos no tienen que creer que los entes vivos violan las leyes que gobiernan la materia inanimada, ni tienen que considerar seriamente la posibilidad de que algún tipo de constituyente especial (como el “élan vital” de Bergson o la “entelequia” de Driesch) les otorgue a los entes vivos su vitalidad. A fin de calificar de natural la distinción entre el nitrógeno y el oxígeno, un científico no tiene que señalar que el nitrógeno y el oxígeno se componen de diferentes tipos de partículas fundamentales. Sin embargo, la distinción entre el nitrógeno y el oxígeno es una distinción ontológica entre dos categorías naturales.

He explicado anteriormente de varias maneras que la distinción entre la vida y la no vida no puede calificarse de inútil para la biología moderna. Pero no he podido explicar todavía la relación entre los “signos de la vida” y la vitalidad, y tampoco el papel que los atributos de la vitalidad podrían tener en la biología. En el párrafo anterior dije que un científico puede calificar de “natural” la distinción entre el nitrógeno y el oxígeno. Presumiblemente, esta actitud lo lleva a considerar como apropiadas ciertas utilizaciones de las categorías del “nitrógeno” y el “oxígeno”. Si es así, ¿cómo utiliza estas categorías? ¿Utilizan los científicos de la misma manera el concepto de la “vida”?

LA VITALIDAD COMO EXPLICACIÓN
DE LOS “SIGNOS DE LA VIDA”

Ya vimos que Sober alega que es inútil atribuir la vitalidad a los entes de *software*, en la medida en que esto va más allá de atribuirles varios de los “signos de la vida”. Sober también alega que hay un obstáculo fundamental para que cualquier ente de *software* despliegue auténticamente cualquiera de estos signos. Aunque un ente de *software* posea una propiedad con la misma “estructura matemática”,¹⁸ podría ser imposible, incluso en principio, que esa propiedad tenga el “contenido empírico”¹⁹ de la propiedad biológica. En cuyo caso, aunque el ente de *software* pueda en cierto sentido *simular* un organismo viviente, no posee auténticamente el signo de vida pertinente. Éste es su argumento:

Muchas propiedades y procesos biológicos involucran relaciones entre un organismo (o parte de un organismo) y algo fuera de él. Un organismo se reproduce cuando genera un vástago. Una planta hace la fotosíntesis cuando se relaciona adecuadamente con una fuente de luz. Un depredador se come a otros organismos. Aunque es posible que una computadora [o ente de *software* (ML)] pudiera replicar ciertos aspectos de los procesos internos de estos sistemas, las computadoras [o entes de *software* (ML)] no se reproducen realmente, ni hacen la fotosíntesis, ni comen, a menos que se relacionen correctamente con las cosas que existen en su entorno.²⁰

Pero un segmento de un código máquina puede contener varias relaciones con entes externos (por ejemplo, otros programas, la unidad central de procesamiento [CPU]), relaciones con una estructura similar a la de las diversas relaciones con otros entes de un ente biológico. El argumento de Sober, por tanto, al parecer no consiste en que la *relación* correcta con las cosas externas sea lo esencial para que un ente pueda mostrar uno de los signos de la vida, sino en que estas cosas externas sean las *cosas externas* adecuadas. Intuitivamente, esto parecería más posible en el caso de la fotosíntesis —es esencial una fuente de luz— que en el caso de la depredación o de la reproducción; no está claro por qué una entidad de *software* no podría ser una presa o un vástago. (Claro es que hay ciertas actividades que requieren una relación con las cosas externas adecuadas; beber,

¹⁸ E. Sober, “Learning from Functionalism — Prospects for Strong Artificial Life”, *op. cit.*, p. 759.

¹⁹ *Idem.*

²⁰ *Idem.*

por ejemplo, presumiblemente requiere que haya líquidos para beber. Pero hasta donde yo sé, beber y comer jamás se incluyen en una lista de los “signos de la vida”. Pienso que es porque se relacionan esencialmente con los alimentos, la alimentación, la salud, etc. —en una palabra, *presuponen* la vitalidad, mientras que ningún “signo de la vida” es una condición suficiente para la vitalidad—. Un “signo de vida” constituye una propiedad estrictamente conductual; comer y beber no son estrictamente conductuales, puesto que presuponen la vitalidad y por lo tanto no son más que una mera “ingestión”.) De hecho, el argumento de Sober presupone que para poseer un cierto signo de la vida, un ente tiene que participar en una relación que no sólo implique una cierta “estructura matemática”, sino también un cierto “contenido empírico”. ¿Con base en qué principio puede Sober defender este alegato? Sus argumentos son débiles, puesto que se niega a arraigar el contexto de un signo de la vida dado en algún concepto del “estar vivo” que vaya más allá de la posesión de los diversos signos. Si los “signos de la vida” representan un grupo arbitrario, entonces no es realmente importante la distinción entre simular o genuinamente poseer uno de ellos, mientras que si tiene algún sentido hacer esta distinción, entonces esto es presumiblemente porque el signo genuino, pero no su simulación, tiene cierta relación con la vitalidad, cosa que es importante porque la vitalidad tiene cierta significación más allá de sus “signos”.

¿En qué sentido? Los “signos de la vida”, aunque individualmente no son necesarios y conjuntamente no son suficientes para que algo esté vivo, tienen una relación especial con la vitalidad: ciertos entes muestran un “signo de vida” peculiar *porque están vivos* (mientras que otros entes no vivientes muestran un “signo de vida” en particular por algún otro motivo). En otras palabras, el que un cierto ente esté vivo explica por qué en determinadas circunstancias pueda reproducirse, pueda metabolizar, pueda moverse, etc. Es esto lo que distingue a los “signos de la vida” de otras propiedades, incluso las simulaciones de tales propiedades. Y yo alego que con base en lo anterior el concepto de la “vida” es útil en la biología.

Para ser más exacto, yo alego que con frecuencia se le ha adjudicado al concepto de la “vitalidad” esta función, y alego además que hasta donde lo podamos saber hoy, bien podría ser que la vitalidad habrá de desempeñar este papel en una teoría biológica correcta. Es una cuestión empírica el hecho de que la distinción entre los entes vivientes y los entes no vivientes sea o no sea efectivamente importante para los biólogos. Será la ciencia quien descubra la respuesta, del mismo modo que ha comprobado que la distinción entre el nitrógeno y el oxígeno es importante y que algunas de las propiedades de un objeto se pueden explicar por el hecho de que el objeto se compone de cobre. Mi propósito no consiste

en descubrir si la vitalidad de algún cuerpo puede efectivamente explicar el hecho de que posea un “signo de vida” en particular. Más bien, intentaré explicar lo que sería necesario para que el concepto de la “vitalidad” fuera capaz de desempeñar esta función. Alegaré que el hecho de que la “vitalidad” sea capaz de desempeñarla no sólo está de acuerdo con nuestro saber sobre los entes vivos, sino que también explica la forma en que los “signos de la vida” funcionan en la biología.

Para entender esto, será conveniente empezar por el examen de algunos casos de la historia de la ciencia. Ciertamente, no es fácil encontrar ejemplos en que los científicos propongan la vitalidad de algún cuerpo como una explicación de que posea varios “signos vitales”. Obviamente, el hecho de que los animales y plantas conocidos eran entes vivos se entendió mucho antes de que se realizara cualquier tipo de investigación científica al respecto. En consecuencia, no se pensaba que valiera la pena decir que si las culebras, por ejemplo, eran entes vivos, entonces el hecho de serlo explicaba por qué podían moverse; a mí me asombraría que en la bibliografía científica encontráramos que tal cosa se propusiera explícitamente como una prueba de que las culebras son entes vivos. Cuando los científicos se propusieron explicar el movimiento de las culebras, lo hicieron para tratar de dar una explicación de este fenómeno, es decir, una descripción distinta a la de la musculatura de las culebras. (Hay muchas maneras de explicar el hecho de que las culebras son capaces de moverse, así como hay muchas maneras de explicar el hecho de que un cierto alambre sea capaz de conducir la electricidad, señalando, por ejemplo, que es de cobre o describiendo la estructura molecular del alambre y la forma en que los electrones pasan a través de él. Existen diferentes explicaciones para el mismo hecho en diferentes contextos.) Voy a examinar dos ejemplos: los cuerpos astronómicos y los hongos.

Se debatió mucho en la época de Galileo la idea muy divulgada de que los cuerpos celestiales estaban vivos. Un argumento que con frecuencia se daba sobre su vitalidad era que ésta explicaba su capacidad para moverse, uno de los “signos de la vida”. Platón así lo dice en términos generales (*El político*, 269c4-270a8; *Timeo*, 38e5, 40a8-b1), y aunque Aristóteles da diversas explicaciones sobre la capacidad de las estrellas y los planetas para moverse, los filósofos escolásticos con frecuencia le atribuían haber relacionado esta capacidad con su vitalidad, especialmente en *Acerca del cielo* (285a29-30, 292a18-21 y 292b1-2: “Por lo tanto debemos pensar que la acción de las estrellas es similar a la de los animales y las plantas”). Una “inferencia de la mejor explicación” aparece en el

resumen de Cicerón²¹ del argumento de Aristóteles en *De philosophie* (manuscrito hoy perdido):

Ciertamente Aristóteles merece alabanza por haber asentado que todo lo que se mueve lo hace gracias a su naturaleza, necesidad o elección. Además, el sol, la luna y todas las estrellas se mueven, pero las cosas que por su naturaleza se mueven lo hacen hacia abajo por su peso, o hacia arriba por su ligereza, nada de lo cual le sucede a las estrellas, ya que su curso describe un círculo. Y ciertamente no se puede decir que es una fuerza mayor la que hace que las estrellas se muevan en una forma contraria a la de la naturaleza de las cosas, ¿pues cuál fuerza mayor que ésta puede existir? Por lo tanto, hay que concluir que el movimiento de las estrella es voluntario.

Aunque los entes no vivientes pueden moverse, la vitalidad puede explicar el movimiento, y ya que ninguna otra explicación es convincente, el movimiento de un objeto es la evidencia de su vitalidad. Este argumento se propuso muy frecuentemente por los filósofos escolásticos y helenistas.²² Ptolomeo²³ dice que la explicación del movimiento planetario es análoga a la explicación del movimiento de las aves. Una de las dos o tres cuestiones más extensamente discutidas después del año 1200 era la de si los planetas estaban vivos o no lo estaban,²⁴ y una frase popular entre los partidarios de su vitalidad es que se movían “de la misma manera que un ave vuela a través del aire o un pez nada en el agua”;²⁵ es decir, la razón por la cual los cuerpos astronómicos pueden moverse es similar a la razón por la cual las aves y los peces pueden moverse.

En cambio, aquellos que sostenían que los cuerpos astronómicos no estaban vivos argüían (dejando de lado los argumentos teológicos), que carecían de varios de los “signos de la vida” y que por lo tanto nada se podía explicar mediante la explicación basada en su vitalidad, o decían que era posible explicar los “signos de la vida” que poseían sin decir que estaban vivos. Aquino, Oresme, Galileo y otros²⁶ alegaban que los cuerpos astronómicos no digerían, crecían o se reproducían. (Algunos partidarios de la vitalidad de los cuerpos astronómicos —por ejem-

²¹ Cicerón, *De natura deorum*, 2.16.14.

²² Véase E. Grant, *Planets, Stars, and Orbs*, Cambridge University Press, Cambridge, 1994, p. 71.

²³ Ptolomeo, *Hipótesis planetaria*, 2.12; véase L. Taub, *Ptolemy's Universe*, Open Court, La Salle, 1993, pp. 117 y ss.

²⁴ E. Grant, *op cit.*, pp. 236, 703.

²⁵ *Ibid.*, pp. 274, 348.

²⁶ *Ibid.*, pp. 473 y ss.

plo, Franciscus Bonae Spei—²⁷ respondieron a esto que la capacidad de crecer y de digerir, aunque resultaban “signos de la vida”, eran fundamentalmente casos de “automovimiento”, y que si bien los cuerpos astronómicos [como las aves] ciertamente se movían sin coerción externa, el hecho de que no crecieran o ingirieran no era una demostración que negara su vitalidad.) Era común el alegato de que siendo homogéneos los cuerpos astronómicos, no tenían órganos sensoriales (según Tomás de Aquino, por ejemplo)²⁸ y carecían de la organización interna que constituye un signo de la vida (según Francisco de Oviedo, por ejemplo).²⁹

Desde la Antigüedad hasta mediados del siglo XIX, los filósofos de la naturaleza también debatieron la cuestión de si los hongos eran entes vivientes, de si mostraban los “signos de la vida” conocidos y, siendo así, si la mejor explicación del hecho era que estaban vivos. Por ejemplo, no se sabía que los hongos crecieran; Plinio, por ejemplo, creía que podían brotar totalmente formados, pero sin estar vivos.³⁰ Ya que por mucho tiempo no se observó nada parecido a una semilla relacionada con los hongos, se creía que no se reproducían. Algunos creían que los hongos eran producto de la humedad (por ejemplo, Bock en 1552, Bauhin en 1623, Medicus en 1788) y que eran simplemente “humedad superflua”;³¹ el mito, común en tiempos de Shakespeare, de que eran el resultado de la condensación de la humedad de la tierra en los suelos pantanosos, como los que había en torno a los molinos de agua, es el origen del vocablo *mildew* [el añublo o moho].³² Muchos autores clásicos (por ejemplo, Juvenal y Plutarco)³³ creían que los rayos o los truenos producían los hongos. A muchos de los que creían que los hongos no poseían ninguno de los “signos de la vida”, les intrigaba la “piedra-hongo”, que siendo aparentemente mineral, cuando se regaba producía un hongo comestible. (Aunque se parece a una piedra grisácea grande —para cortarla hay que usar un serrucho— esta piedra hongo es en realidad el particularmente duro esclerocio del hongo *Polyporus tuberaster*). Muy comentada desde la Antigüedad,³⁴ esta piedra-hongo fue la causa de que muchos (incluso Villemet en 1784) clasificaran a

²⁷ *Ibid.*, p. 483.

²⁸ *Ibid.*, p. 475.

²⁹ *Ibid.*, pp. 481 y ss.

³⁰ Plinio, *Naturalis historia*, libro XIX, sección 11.

³¹ G. C. Ainsworth, *Introduction to the History of Mycology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1976, pp. 13, 18.

³² E. C. Large, *The Advance of the Fungi*, Dover, Nueva York, 1962, p. 18.

³³ Véase W. Houghton, “Notices of Fungi in Greek and Latin Authors”, en *Annals and Magazine of Natural History Series*, 5 (15): 22-49, 1885.

³⁴ Véase J. Ramsbottom, “The Fungus Stone”, *Proceedings of the Linnean Society*, 144: 76-79, 1931-1932; J. Ramsbottom, “The Expanding Knowledge of Mycology since Linnaeus”, *Proceedings of the Linnean Society*, 151: 311, 1938-1939.

los hongos en el reino mineral.³⁵ Por otra parte, algunos científicos decían que la vitalidad de los hongos explicaba su organización interna (por ejemplo, Seyffert en 1744),³⁶ su crecimiento (por ejemplo, Buillard en 1793)³⁷ y su capacidad de movimiento (por ejemplo, la explosión del “mortero” de *Lycoperdon carpobolus*, que Durande en 1783 vio como un signo de la vida y que posteriormente se explicó como la función de la dispersión de las esporas).³⁸

(Expondré brevemente aún otro ejemplo histórico. En 1827 el botánico inglés Robert Brown observó a través de un microscopio que los granos de polen suspendidos en agua realizan incesantes movimientos erráticos. Puesto que sabía empíricamente que los movimientos no se debían a las corrientes en el agua ni a su gradual evaporación, Brown³⁹ pensó que se derivaban de la vitalidad de los granos de polen —hasta que se percató de que las partículas de polvo que no provenían de entes vivientes mostraban el mismo movimiento [posteriormente llamado “browniano”]—. Brown⁴⁰ comentó otros casos, sobre los cuales cierto científico había desplegado un “muy ingenioso razonamiento [...] para mostrar que, para explicar los movimientos [de un objeto], la conjetura menos improbable es suponer que está animado”).

Estos ejemplos sugieren que la afirmación “está vivo” a veces se ha considerado como algo que es capaz de explicar por qué un cierto objeto posee un cierto “signo de vida”. Por ende, a fin de entender el papel que en la ciencia podría jugar el concepto de “vida”, debemos entender el valor que tienen estas supuestas explicaciones para quienes las profieren. El valor informativo que pudieran tener estas “explicaciones” es especialmente dudoso con base en dos consideraciones. Primero, ya he señalado que los científicos esperan que haya explicaciones de estos mismos fenómenos que no invoquen la vitalidad, como en el caso de la culebra, cuya capacidad de moverse se explica mediante el examen de su anatomía y fisiología. ¿Qué utilidad puede tener, pues, una explicación que invoque a su vez la “vida”? Segundo, los científicos proponen estas explicaciones sin saber lo que implica la vitalidad, más allá de la existencia de los diversos “signos de la vida”. Siendo así, no es en absoluto evidente que la invocación de la “vitalidad” de un objeto tenga el poder de explicar por qué éste posee varios “signos de la vida”.

³⁵ G. C. Ainsworth, *op. cit.*, p. 32.

³⁶ Véase J. Ramsbottom, “The Expanding Knowledge of Mycology since Linnaeus”, *op. cit.*, p. 313.

³⁷ Véase G. C. Ainsworth, *op. cit.*, p. 32.

³⁸ J. Ramsbottom, “The Expanding Knowledge of Mycology since Linnaeus”, *op. cit.*, pp. 311-312.

³⁹ R. Brown, “A Brief Account of Microscopical Observations Made in the Months of June, July and August 1827, on the Particles Contained, in the Pollen of Plants”, *Philosophical Magazine*, 4: 161-173, 1828.

⁴⁰ R. Brown, “Additional Remarks on Active Molecules”, *Philosophical Magazine*, 6: 164-165, 1829.

EL VALOR DE LAS EXPLICACIONES QUE INVOCAN LA VITALIDAD

Anteriormente, indiqué las diversas formas en que utilizar el concepto de “está vivo” para explicar por qué un objeto posee un cierto “signo de vida”, es similar a utilizar el concepto de “es de cobre” para explicar por qué un objeto conduce la electricidad. Ninguna de las dos explicaciones describe la estructura del objeto, o especifica cómo ésta produce el fenómeno que se pretende explicar. Tanto “está vivo” como “es de cobre” se consideraban explicaciones mucho antes de que se supiera cualquier cosa sobre las respectivas estructuras. Ahora seguiré examinando esta semejanza; yo planteo que si “está vivo” es en efecto una explicación, entonces nos ayuda a entender por qué un objeto muestra cierto signo de vida de la misma manera que “es de cobre” nos ayuda a entender por qué un objeto conduce la electricidad.⁴¹

¿Cómo sería esto? Todas las explicaciones nos informan que el fenómeno que se pretende explicar resulta totalmente de la naturaleza del objeto dado. Una razón por la que esta explicación es útil se deriva de que nos informa, en relación con ciertos datos sobre la situación actual del objeto, que estos datos son irrelevantes respecto al fenómeno que se explica. Por ejemplo, si se nos dice que el objeto conduce la electricidad porque es de cobre, entonces sabemos que también hubiera conducido la electricidad si su forma hubiera sido diferente o si el lugar en que estaba hubiera sido diferente o si su color hubiera sido diferente —si ya

⁴¹ Una disimilitud entre “está vivo” y “es de cobre” es que el hecho de que los objetos de cobre conduzcan la electricidad es una ley natural, mientras que en relación con muchos signos de la vida (por ejemplo, la motilidad) no es ni siquiera verdad —y mucho menos una ley de la naturaleza— que todos los entes vivientes poseen ese signo de vida. Si Fa explica Ga sólo cuando “todas las efes [F] son ge [G]” es físicamente necesario, entonces el hecho de que un objeto *a* sea viviente no puede explicar por qué el objeto *a* posee ciertos signos de vida. Pero yo no creo que Fa explique Ga sólo cuando Fa físicamente necesite a Ga. La relación exacta entre la ley natural y la explicación científica jamás se ha explicado adecuadamente. Aunque no puedo seguir con este *tópico* aquí, acaso sea útil que exprese mi idea de que la pertinencia explicativa de Fa para Ga se deriva de los valores de verdad de varios condicionantes contrafactuales (por ejemplo, acaso de la falsedad de “si Fa no hubiera resultado, entonces Ga de todas maneras hubiera resultado”). Puesto que las leyes de la naturaleza respaldan a los contrafactuales, el hecho de que sea una ley natural que todas las efes [F] son ge [G], puede ser responsable de los valores de verdad de algunos de estos diversos contrafactuales. Pero incluso si no es físicamente necesario que todas las efes [F] sean ge [G], es posible que estos diversos contrafactuales tengan los valores de verdad que permiten que Fa explique a Ga. Por lo tanto, una explicación contrafactual de una explicación científica podría permitir que el hecho de que *a* sea *viviente* explicara por qué el objeto *a* posee ciertos signos de vida, y del mismo modo podría permitir que el hecho de que el objeto *b* sea de cobre explicara por qué el objeto *b* conduce la electricidad, aun cuando no sea físicamente necesario que un objeto de cobre conduzca la electricidad. Para una defensa del planteamiento contrafactual en la explicación científica, véase M. Lange, “Dispositions and Scientific Explanation”, *Pacific Philosophical Quarterly*, 75: 108-132, 1994.

supiéramos que seguiría siendo de cobre en esas circunstancias—. Además, sabemos que acaso ya no conduciría la electricidad si tuviera que participar en una reacción química. Similarmente, al atribuir, por ejemplo, la motilidad de un objeto a su vitalidad, damos a entender que ciertas circunstancias externas son irrelevantes en relación con su capacidad de moverse, mientras que no es irrelevante el funcionamiento adecuado de sus órganos corporales. Esto se destaca en los ejemplos donde la vitalidad del objeto no tiene una relevancia explicativa. Por ejemplo, que Leo, el león, sea un ente viviente no explica por qué Leo se mueve en cierto momento en una dirección en vez de otra, ya que la dirección que toma depende de las circunstancias externas. Similarmente, que Leo sea un ente viviente no explica por qué se mueve hacia abajo cuando se tira desde de un avión, ya que Leo también se caería hacia abajo si no fuera un ente viviente; es irrelevante el funcionamiento adecuado de sus órganos corpóreos.

Claro, el poder que tiene el concepto de “el objeto *a* es de cobre” para explicarnos por qué el objeto *a* conduce la electricidad, no puede deberse totalmente al hecho de que el concepto de “porque es de cobre” nos explica en relación con ciertos hechos que éstos son relevantes (en un sentido basado en los contrafactuales) para la conductividad eléctrica de *a*, y en relación con otros hechos que éstos son irrelevantes para la conductividad eléctrica de *a*. Si queremos saber por qué una persona que consumió opio se quedó dormida, y se nos dice que se debe a que el opio tiene la virtud de inducir el sueño, aprendemos algo sobre lo que es relevante y lo que es irrelevante en relación con el hecho que se explica —por ejemplo, que es irrelevante el hecho de que la persona que tomó el opio llevara puesta una camisa azul—. Sin embargo, usualmente se piensa que una afirmación que le atribuye a algo una propiedad física (por ejemplo, “el opio induce el sueño”) no puede explicar una manifestación de esa propiedad.⁴² Asimismo, el hecho de que el concepto de “El objeto *a* es un ente viviente” pueda indicar la vía hacia una explicación genuina del hecho de que el objeto posea un signo de vida dado, y que incluso pueda en ciertos contextos representar esa explicación (al decirnos todo lo que queríamos saber cuando preguntamos por qué el objeto posee ese signo de la vida), no significa que el concepto de “El objeto *a* está vivo” sea en sí mismo explicativo.

¿Qué pasaría si “Está vivo” tuviera el mismo tipo de poder explicativo que “Es de cobre”? Para entender la significación cabal de decir el “objeto *a* conduce la electricidad porque es de cobre”, debemos recordar que “porque es de cobre” da respuesta a muchas otras preguntas de “por qué”, tanto sobre el objeto dado (“¿Por

⁴² Para una discusión más detallada de esta perspectiva, con las referencias a sus partidarios y una explicación de por qué resulta correcta, véase M. Lange, *op. cit.*, pp. 108-112.

qué tiene conductividad térmica a ?”) como sobre otros objetos (“¿Por qué tiene conductividad eléctrica el objeto b ?”) Al decir “el objeto a tiene conductividad eléctrica porque es de cobre”, damos a entender que si la conductividad eléctrica de a se explicara más detalladamente, la explicación tendría algo en común con las explicaciones detalladas de la conductividad térmica de a y la conductividad eléctrica de b , algo que es importante. Mucho antes de que los científicos supieran gran cosa sobre la estructura de los objetos de cobre o sobre el hecho de que su estructura los convierte en excelentes conductores de la electricidad y el calor, los científicos suponían que existen propiedades que cualquier objeto de cobre tiene en común con todos los demás de manera no accidental, es decir, en virtud de que todos son de cobre, y de que su conductividad eléctrica y térmica puede explicarse por estas propiedades.

Claro es que todas estas explicaciones pueden tener diferencias primordiales; el mecanismo mediante el cual el cobre conduce la electricidad es diferente del mecanismo mediante el cual el cobre conduce el calor. Sin embargo, la estructura del cobre es crucial en ambos fenómenos. Los científicos al principio no sabían mucho sobre esta estructura. Consideraban que “Es de cobre” era una explicación; no lo hubieran pensado así si no hubieran creído que hay semejanzas importantes entre estas diversas explicaciones detalladas. Para decirlo *grosso modo*: resulta explicativo clasificar una cosa como “cobre” —este término denota una categoría natural, más que una categoría artificial— precisamente porque existen tales similitudes, es decir, porque resulta heurísticamente útil para los científicos suponer que algunos aspectos importantes de estas diversas explicaciones son similares. En otras palabras, los científicos aprenden más sobre el mundo y con mayor rapidez cuando esperan que algunos aspectos importantes de estas explicaciones serán similares —y, en consecuencia, cuando consideran que sus descubrimientos sobre cómo a conduce la electricidad confirman inductivamente una cosa similar sobre la razón por la que b conduce el calor— que lo que podrían aprender si consideraran que estas tareas explicativas no se relacionan entre sí.

Yo creo que algunos científicos esperan que el concepto del “ente viviente” tenga la misma utilidad y cumpla la misma función que el concepto del “cobre”. Es decir, que esperan que cualquier par de entes vivientes muestren sus respectivos “signos de vida” por sendas razones similares, tanto como importantes.⁴³ Los

⁴³ En estas “razones” no pretendo incluir las razones históricas, por ejemplo, las que se relacionan con la selección natural. Son las razones que relaciono con el mecanismo mediante el cual los entes vivientes logran mostrar sus signos de vida. (En breve daré un ejemplo de esto.) La participación en la selección natural es comúnmente considerada un “signo de vida”, uno que también los virus poseen pero que no poseen (como en breve explicaré) los virus computacionales.

científicos que creen que los entes vivientes constituyen una categoría natural reconocen que en los entes vivientes la similitud de las razones por las que muestran varios signos de vida debe yacer en un nivel bastante profundo. Recordemos, por ejemplo, que aquellos que veían como entes vivientes a los cuerpos astronómicos sostenían que se movían “del mismo modo que una ave vuela a través del aire o un pez nada en el agua”; sostenían, en otras palabras, que la razón por la cual se mueven los cuerpos astronómicos es similar a la razón por la cual las aves y los peces pueden moverse. A fin de ver cuán abstracta esperaban que fuera la semejanza, dejemos por un momento de lado los cuerpos astronómicos. Aunque los detalles de cómo lograban las aves y los peces moverse eran todavía desconocidos, estos científicos indudablemente sabían que algunos aspectos significativos de las razones por las cuales las aves pueden moverse a través del aire tenían que ser diferentes de las razones por las cuales los peces se mueven a través del agua. No obstante, estos científicos aparentemente esperaban que ciertos aspectos fundamentales de estas explicaciones fueran similares —y que también fueran similares a las explicaciones sobre la capacidad de los cuerpos astronómicos para moverse—.

La ciencia ha demostrado que las cosas de cobre constituyen una categoría natural. El que los entes vivientes constituyan o no una categoría natural también es una cuestión que tendrá que resolver la investigación científica. Sigue siendo una cuestión debatible; actualmente los científicos no están de acuerdo al respecto. Lederberg, por ejemplo, al parecer cree que los entes vivientes probablemente poseen sus signos de vida respectivos por razones muy similares. En cambio, a Medawar le impresiona lo poco que se ha derivado de las investigaciones (por ejemplo, las de los vitalistas) guiadas por la presuposición de que los entes vivientes constituyen una categoría natural, y él con sobrada razón ve que la esterilidad de este planteamiento en el pasado, en cierto sentido constituye una impugnación del mismo.

A los investigadores de ALife los motiva la idea de que los “organismos de *software*” artificiales poseen varios “signos de la vida”, fundamentalmente por las mismas razones que los poseen los organismos naturales de “laboratorio”; estos científicos pretenden proyectar inductivamente sus posibles descubrimientos sobre la “vida artificial” en los organismos naturales. Efectivamente, muchos investigadores de ALife creen que ya han empezado a elucidar una similitud importante en las razones por las cuales los entes vivientes muestran varios “signos de vida”. Los investigadores de la vida artificial actualmente describen esta semejanza refiriéndose a la forma “paralela”, “distribuida”, “descentralizada”, “abajo-arri-

ba”, “autoorganizada”, “emergente”, en que los “signos de la vida” surgen en los entes vivientes. Estos términos con frecuencia no se describen cabalmente, pero la idea general parece ser *grosso modo* que un ente viviente no posee un “signo de vida” como resultado de la actividad organizadora de alguna función central coordinadora que llevara a cabo un plan establecido, sino como resultado de interacciones locales entre muchos componentes autónomos, cada cual gobernado por las mismas leyes. Mi propósito no consiste en evaluar aquí las posibilidades reales de llegar a crear o simular la vida mediante el desarrollo de un *software* que se organice de esta manera. Solamente quiero entender qué papel pretende que desarrolle el concepto de la “vida” cualquier programa de investigaciones de la vida artificial, así como entender cómo los entes vivientes, aunque sean diferentes en muchos aspectos, pueden poseer signos de la vida por “la misma razón”.

Aquellos que participan en este programa de investigaciones no ven la vitalidad como una propiedad disposicional —es decir, como la virtud dormitiva, la solubilidad del agua y la absorbencia del agua—. Una afirmación disposicional (por ejemplo, “Este cubo es soluble en el agua”) constituye una descripción mínima; al considerar una cierta propiedad (la calidad de ser D) como disposicional, un científico piensa que los objetos que poseen esta propiedad pueden tener microestructuras y mecanismos fundamentalmente diferentes mediante los cuales manifiestan esta disposición. En otras palabras, el científico sostiene que todos los posibles objetos D son similares en virtud que son objetos D *tan sólo* en la manera en que responderían a un tipo particular de estímulo en ciertas circunstancias (por ejemplo, tan sólo en que se disolverían cuando fueran sumergidos en el agua en condiciones estándar). Por ejemplo, una molécula iónica (tal como el cloruro de sodio) es soluble en agua por una razón muy distinta a la razón por la cual una molécula covalente (tal como la sacarosa) es soluble en agua. Asimismo, una tela absorbe el agua porque el agua puede incorporarse en todas sus fibras, mientras que otra tela absorbe el agua porque el agua puede introducirse entre sus fibras; ambas telas pueden absorber el agua, pero su semejanza por poseer esta propiedad disposicional no se deriva de una similitud en su microestructura o en su mecanismo. Los científicos que ven como disposicional una propiedad (de ser) D esperan que no haya afirmaciones-leyes del tipo de “Todos los objetos D son...”; para decirlo *grosso modo*: no están dispuestos a proyectar inductivamente sus descubrimientos sobre la microestructura o el mecanismo de la propiedad (de ser) D, en todos los otros posibles entes D.⁴⁴ En cambio, los investiga-

⁴⁴ Con frecuencia se ha alegado que no toda confirmación de “todas las F son G” es una confirmación *inductiva*, y que sólo podemos confirmar *inductivamente* “todas las F son G” si creemos que esta regula-

dores de ALife piensan que los organismos vivos constituyen una categoría natural, al igual que los objetos de cobre. Para ellos, “Es un ente vivo” no es una descripción mínima. Esperan (aunque no estén seguros) que cualquier par de entes vivos posean (en algún sentido fundamental) sus signos de vida por la misma razón. En consecuencia, ellos están dispuestos a considerar los descubrimientos que hagan sobre el mecanismo responsable de que un ente vivo posea un cierto signo de la vida, como una confirmación inductiva de una hipótesis —una especie de ley— sobre todos los entes vivos; es decir, como una confirmación (*grosso modo*), respecto a cualquier otro ser vivo, de algo similar sobre la razón por la cual éste posee sus signos de la vida. Si estos científicos están en lo cierto, entonces la vitalidad contrasta con las propiedades disposicionales en virtud de su capacidad para figurar en las explicaciones científicas.⁴⁵

Es posible que los entes vivos constituyan una categoría natural. Si así fuera, entonces, como ya expliqué, la común clasificación de varios objetos como “vivos” sería útil como una manera de aprender más sobre ellos. Nuevamente hay que subrayar que el propósito de tales investigaciones es aprender más sobre los entes vivos, no necesariamente definir la “vida” reductoramente. Acaso sea más fácil entender esto en relación con otros conceptos coloquiales cuya utilidad para la ciencia no es todavía obvia y cuyo papel, si resulta que son útiles, sería análogo al concepto de la “vida”. Consideremos, por ejemplo, el concepto de “tormenta”. La gran mancha roja de Júpiter y la gran mancha negra de Neptuno se categorizan con frecuencia como “tormentas”. Uno podría preguntar: ¿se trata de una analogía aproximada o se trata verdaderamente de “tormentas”? Varios científicos creen que aunque estos fenómenos presentan algunos de los aspectos de las tormentas terráneas, las razones por las que la gran mancha roja y la gran mancha negra muestran estos aspectos no son similares a las razones por las que estos aspectos aparecen en las tormentas terráneas; y, además, que hay muchos tipos fundamentalmente diferentes de “tormentas” terráneas cuyas semejanzas son solamente superficiales. Estos científicos no ven ningún interés en preguntar

ridad es físicamente necesaria. Pero esto requiere el considerable cuidado de expresar la diferencia intuitiva entre la confirmación inductiva y el simpliciter de la confirmación en términos precisos (por ejemplo, en términos del cálculo de probabilidad). Yo lo hago en un libro que está por aparecer, demostrando que no podemos confirmar que “todas las F son G” inductivamente si creemos que esta afirmación es una generalización accidental cuando es una afirmación verdadera.

⁴⁵ Para justificar adecuadamente esta afirmación, yo necesitaría proponer un concepto de la explicación científica que revelara con precisión por qué una afirmación disposicional es ociosa en una explicación científica de una manifestación con esa disposición. Propongo tal explicación en M. Lange, *op. cit.* Allí expongo y defiendo la tosca caracterización que acabo de hacer sobre la distinción entre las propiedades disposicionales y las propiedades categóricas.

si la gran mancha roja es “realmente” una tormenta. Otros científicos no están de acuerdo. Creen que la gran mancha roja y la gran mancha negra muestran varios aspectos debido a razones que son, por algunos motivos profundos (y casi desconocidos), similares a las razones por las cuales las tormentas terráqueas muestran los mismos aspectos. Creen que mucho se puede aprender sobre las tormentas terráqueas estudiando los fenómenos en la atmósfera de otros planetas. Si esto resulta ser cierto, entonces la categoría de “tormenta” sería una categoría natural y todos estos fenómenos serían realmente “tormentas”. Pero no hay por qué considerar que estas investigaciones se proponen *definir* “tormenta” en otros términos (aunque pudiera producirse una definición); las investigaciones podrían simplemente proponerse el descubrimiento de las leyes naturales relacionadas con las tormentas. Al pensar que podemos entender mejor las tormentas terráqueas mediante la proyección inductiva a partir de las tormentas que involucran constituyentes materiales muy diferentes y que existen en condiciones muy diferentes, estos astrónomos son similares a los investigadores de la vida artificial.

Hay quienes dirían que incluso si todos los entes que se encuentran en el límite del espectro de la vida poseen como fenómenos “emergentes” muchos de los signos de la vida, el hecho de poseer muchos signos de la vida por tal razón no puede ser parte de *lo que es* ser un ente viviente. Pues podemos concebir la existencia de un ente que es intuitivamente viviente pero que posee muchos signos de la vida por otro motivo totalmente diferente. No estoy dispuesto a respaldar un análisis de la “vitalidad” como “emergencia”; es demasiado pronto para saber si estas investigaciones habrán de florecer o incluso para saber si su idea de la “emergencia” está bien definida. Pero no creo que el tipo de análisis de la “vitalidad” que este programa de investigaciones pretende proporcionar sea inhabilitado por nuestra capacidad para concebir la existencia de un ente viviente que posea muchos signos de la vida por razones “no emergentes”. Del mismo modo, un químico del finales del siglo XIX que hubiera aceptado la teoría atómica antes del descubrimiento del protón, hubiera dicho (tras oír algo sobre estos hipotéticos “protones”) que podía imaginar un átomo de oro que no tuviera 79 protones. Esto no se hubiera tomado como un impedimento para el análisis del “oro” como el elemento químico cuyos átomos contienen 79 protones. La mejor manera de que entendamos varios episodios de la historia de la ciencia es considerando que los científicos están dispuestos a aceptar que una cosa es “oro” si posee y solamente si posee la misma estructura fundamental de ciertas muestras paradigmáticas del oro. Nosotros podemos (y los científicos del siglo XIX pudieron) concebir diferentes explicaciones de esta estructura fundamental. Asimismo, yo he sugerido

do que la mejor manera de entender varios episodios de la historia de la ciencia es si consideramos que los científicos están dispuestos a aceptar que alguna cosa es “viviente” si ésta y sólo cuando ésta posea muchos “signos de la vida”, por la misma razón fundamental que ciertos ejemplos paradigmáticos de los entes vivientes los poseen. Y podemos concebir varias explicaciones diferentes de esta razón fundamental.

LA VIDA ES INTERESANTE MÁS ALLÁ
DE LOS “SIGNOS DE LA VIDA”

Es posible que la mayoría de los entes que posean un “signo de la vida” dado (por ejemplo, el crecimiento) no posean ninguno de los otros “signos”. Pero el hecho de que un ente cualquiera sea viviente puede verse como una significativa evidencia de que puede poseer un cierto signo de la vida, aun cuando jamás se haya observado que lo posea. Claro que esta evidencia no sería terminante —un ente viviente no tiene que poseer todos los “signos de la vida”— pero por lo menos puede permitirles a los científicos buscar más cuidadosamente los indicadores de que el objeto pueda poseer más “signos de la vida”. Por ejemplo, los naturalistas de los siglos XVI, XVII, y XVIII que creían que no había pruebas directas (todavía) de que los hongos se reproducen, pero que sí creían que eran entes vivientes, pensaban que los hongos probablemente se reproducían, de manera que si uno buscaba sus semillas cuidadosamente es probable que las descubriera. Aunque Della Porta había identificado las semillas en 1588 y Michelli, en 1729, había comprobado que éstas eran los medios de reproducción de los hongos, muchos científicos fracasaron en sus intentos por replicar sus observaciones. Así, vemos que todavía en 1785 Durande alegaba que puesto que poseían diversos “signos de la vida”, los hongos presumiblemente tenían semillas, aunque fueran demasiado pequeñas para haberse descubierto aún.⁴⁶

Si un científico considera que los entes vivientes constituyen una categoría natural, entonces también considera que la hipótesis de que algo posea un “signo de la vida” dado se confirma menos por el hecho de mostrar algún otro “signo de la vida”, que por el hecho de que muestre ese signo de la vida *por la razón de que los entes vivientes lo hacen*.⁴⁷ Esto no quiere decir que para el científico el hecho de

⁴⁶ J. Ramsbottom, “The Expanding Knowledge of Mycology since Linnaeus”, *op. cit.*, pp. 312, 316-317.

⁴⁷ Para saber si algún “organismo de *software*” posee un cierto signo de vida, ¿no sería mucho mejor que se lo preguntáramos a los programadores en vez de intentar observar si posee o no otros signos de la vida? (Le agradezco a un anónimo árbitro haber hecho esta pregunta.) Mi primera respuesta es señalar que la secuencia de instrucciones para constituir un “organismo de *software*” pudieron no haber sido

que una cosa muestre un "signo de la vida" peculiar por la misma razón que los entes vivientes lo hacen (acaso como un fenómeno "emergente") *asegure* que esa cosa está viva. Un virus computacional puede mostrar un signo de vida peculiar (por ejemplo, la homeostasis, cuando se adapta a diferentes sistemas operativos, compensa la insuficiencia del almacenamiento, o vence los mecanismos antivirales) por la misma razón que lo hacen los entes vivientes. Sin embargo, un virus computacional, al igual que un virus biológico, posee tan pocos signos de vida de otro tipo que en el mejor de los casos cae en la misma región intermedia entre la vida y la no vida, como sucede con los virus biológicos. (Y los virus computacionales contemporáneos no poseen algunos de los signos de vida que los virus biológicos poseen. Por ejemplo, actualmente no hay virus computacionales que evolucionen, a menos que los programadores deliberadamente los alteren o los programen para cambiar ligeramente cuando se copian a fin de que su progenie evite la detección. Los virus computacionales contemporáneos no evolucionan "naturalmente" como lo hacen los virus biológicos. Al parecer es por razones de este tipo que en el pasaje que cité antes, Farmer y Belin nieguen que los actuales virus computacionales estén tan vivos como los virus biológicos.)⁴⁸ El hecho de que un ente muestre un signo de vida por la misma razón que lo hacen los entes vivientes no es suficiente para hacer que esté vivo ese ente. Pero (si los entes vivientes constituyen una categoría natural) este hecho contribuye a la vitalidad del ente, es decir, lo acerca más al estado viviente.

Anteriormente dije que la hipótesis de que una cosa posea un "signo de la vida" dado se confirma menos por el hecho de que posea otro "signo de la vida"

diseñadas por un programador. Más bien, pudieron haber resultado de una "selección no natural": se produjo una población aleatoria de cadenas de un código computacional; sus miembros fueron graduados según algún criterio; se borraron los peores; los mejores fueron "acoplados", al tiempo que se introdujeron mutaciones y cruzamientos aleatorios; y el proceso se repitió en la siguiente generación. Se han generado programas computacionales complejos mediante este tipo de "algoritmo genético". La objeción entonces podría ser que a fin de determinar si algún "organismo de *software*" posee un cierto signo de vida, sería mejor que examináramos la secuencia de instrucciones constituyentes del "organismo", en vez de observar si posee otros signos de vida. Pero lo mismo se podría decir de un organismo biológico; si supiéramos lo suficiente sobre la biología molecular podríamos observar si un organismo biológico posee cierto signo de vida mediante el examen de su genética. Este hecho nada disminuye el valor confirmatorio de observar si alguna cosa muestra un signo de vida dado cuando no tenemos acceso a las instrucciones o no conocemos bien la biología molecular. Finalmente, aun cuando supiéramos la secuencia de instrucciones, podría ser que pudiéramos establecer con seguridad si el programa posee o no un signo de vida dado al ponerlo en funcionamiento (o al simularlo eficazmente) (véase, por ejemplo, S. Wolfram, "Undecidability and Intractability in Theoretical Physics", *Physical Review Letters*, 54: 735-738, 1985). Para confirmar la *predicción* de que el ente de *software* posee un signo de vida dado, nos puede ser útil observar si posee otros signos de vida diferentes.

⁴⁸ Véase E. Spafford, "Computer Viruses as Artificial Life", *Artificial Life*, 1: 249-265, 1994.

que por el hecho de que muestre este signo por la misma razón que lo hacen los entes vivientes. Uno podría responder que esta diferencia en el valor confirmatorio no sería una indicación de que a los científicos les importa más la vitalidad de un ente que el hecho de que posea muchos “signos de la vida”, puesto que la hipótesis de que un ente posea un “signo de la vida” dado se confirma menos por el hecho de que posea algún otro “signo de la vida” que por el hecho de que posea muchos otros “signos de la vida”. No obstante, el que posea muchos otros “signos de la vida” no constituye una gran prueba de que posea el “signo de la vida” dado si negamos que posea estos otros “signos de la vida” por la misma razón que los entes vivientes lo poseen.

A los científicos no sólo les interesa que un ente posea un “signo de la vida” peculiar, sino también si lo posee por la misma razón que los entes vivientes lo poseen. Como ya vimos, a los científicos les interesa si el hecho de que un objeto posea un “signo de vida” peculiar contribuye a su vitalidad, no sólo porque a los científicos les interesa descubrir cuáles son los otros “signos de la vida” que pueda poseer, sino también porque a los científicos les interesa explicar por qué posee el signo de vida particular. Anteriormente vimos que Sober dice que los entes de *software* son capaces de simular ciertos “signos de la vida”, pero que no pueden poseerlos auténticamente. Yo alegué que si (como dice Sober) a la ciencia no le interesara la vitalidad de un objeto más allá de los “signos de la vida” que pueda poseer, entonces la ciencia no tendría fundamentos para establecer la distinción que Sober invoca: la distinción entre el hecho de que un objeto posea un “signo de la vida” peculiar y de que un objeto simule un “signo de la vida” peculiar. Los científicos que creen que los entes vivientes constituyen una categoría natural tienen razón en distinguir entre el hecho de que un objeto posea un signo de vida peculiar en una forma que contribuya a su vitalidad, y el hecho de que posea un signo de la vida peculiar en otra forma. Por ejemplo, cuando los investigadores de ALife alegan que un ente de *software* no simula una actividad que poseen ciertos entes vivientes, sino que en realidad lleva a cabo exactamente la misma actividad, su argumento consiste en que la razón tras el desempeño del ente de *software* es fundamentalmente similar a la explicación del mismo desempeño en los entes vivientes conocidos. Veamos un ejemplo: a fin de ayudar a los conductistas de animales a comprender cómo las aves de una bandada logran volar juntas de manera coordinada, se desarrolló recientemente un programa computacional⁴⁹ que pone en movimiento figuras en forma de aves en la pantalla de la computadora de

⁴⁹ C. Reynolds, “Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavior Model”, *Computer Graphics*, 21 (4): 25-34, 1987; véase también C. Emmeche, *op. cit.*, pp. 88 y ss.

acuerdo con ciertas reglas sencillas que determinan cómo la velocidad de cada figura en cada momento cambia de acuerdo con la posición y la velocidad de las otras figuras adjuntas un momento antes. El resultado es que las figuras realizan las vueltas y giros característicos de las bandadas de pájaros (y los bancos de peces y las manadas de mamíferos). Los investigadores de ALife han argumentado que estas figuras (aunque obviamente no vivientes) vuelan en conjunto —duplicando, no imitando, lo que las aves hacen— y su argumento⁵⁰ es que la conducta coordinada de estas figuras se explica en la misma forma “descentralizada, abajo-arriba” que la de la organización de una bandada de aves. No hay un ave que dirija a las demás; la conducta colectiva emerge de muchas interacciones locales entre aves autónomas, comportándose todas de acuerdo con las mismas reglas sencillas.

Por ende, si (como dice Sober) la ciencia no se interesa en si un ente está vivo más allá de si desempeña o no una serie de actividades, entonces todos y cada uno de los desempeños en la serie deben consistir no solamente en mostrar un “signo de vida” dado, sino en mostrarlo *por cierta razón*. Pero esto es solamente mostrar el “signo de la vida” dado por la misma (acaso desconocida) razón que lo hacen diversos entes vivientes. En otras palabras, las actividades en *esta* serie actualmente no son inteligibles independientemente del concepto de que sea un animal viviente; este concepto se utiliza para distinguir entre un desempeño auténtico de una de estas actividades, y una simulación.

En conclusión: los partidarios de la *va-dura* no deben sentirse obligados a proponer una *definición* de la “vida” a fin de justificar su dictamen de que un cierto ente de *software* es un ente viviente. Además, deben reconocer (al contrario de Langton en el pasaje que cité antes)⁵¹ que sus argumentos a favor de la vitalidad de un cierto “organismo de *software*” artificial, en realidad no dependen tanto del número de “signos de la vida” que posea, sino de la *razón* por la que posee cualquiera de los signos: por la misma razón que los entes vivientes paradigmáticos lo poseen. Que haya o no tal razón común es algo que la ciencia tiene que descubrir. Aunque los entes de *software* no puedan poseer ciertas capacidades (por ejemplo, la de la fotosíntesis), para la vitalidad no es necesario un signo de vida en particular. La relación entre los “signos de la vida” y la vitalidad sigue siendo oscura, puesto que todo el mundo ha aceptado que los signos no son ni individualmente necesarios ni conjuntamente suficientes para la vitalidad. Yo he propuesto una nueva reconstrucción racional de esta relación: según muchos científicos, los en-

⁵⁰ C. G. Langton, “Artificial Life”, *op. cit.*, pp. 32-33.

⁵¹ C. G. Langton, “Introduction”, *op. cit.*, pp. 19-20.

tes vivientes constituyen una categoría natural y la vitalidad a veces explica por qué un ente posee varios “signos de la vida”. Actualmente, yo veo pocas razones para creer que es en principio imposible que un segmento de un código máquina muestre varios signos de la vida porque está vivo. La idea de que a los biólogos no les interesa diferenciar la vida de la no vida, sino solamente identificar cuáles son los “signos de la vida” que diversos entes poseen, ignoran las dificultades para especificar los “signos” que a los biólogos les interesan sin invocar el concepto de la “vida”. Y pasa por alto la utilidad y la función, evidente en muchos episodios de la historia de la ciencia, que el concepto de la “vida” ha desempeñado en las explicaciones científicas.

BIBLIOGRAFÍA

- Ainsworth, G. C., *Introduction to the History of Mycology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1976.
- Brown, R., “A Brief Account of Microscopical Observations Made in the Months of June, July and August 1827, on the Particles Contained, in the Pollen of Plants”, *Philosophical Magazine*, 4: 161-173, 1828.
- , “Additional Remarks on Active Molecules”, *Philosophical Magazine*, 6: 164-165, 1829.
- Curtis, H., *Invitation to Biology*, Worth, Nueva York, 1977. [Versión en español: *Invitación a la biología*, trad. de Ramón Margalef, Médica Panamericana, Buenos Aires, 2006.]
- Emmeche, C., *The Garden in the Machine: The Emerging Science of Artificial Life*, Princeton University Press, Princeton, 1994. [Versión en español: *Vida simulada en el ordenador: la nueva ciencia de la inteligencia artificial*, trad. de Carlos de la Reta, Gedisa, Barcelona, 1998.]
- Farmer, J. D., y A. Belin, “Artificial Life: The Coming Evolution”, en C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rassmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1991.
- Grant, E., *Planets, Stars, and Orbs*, Cambridge University Press, Cambridge, 1994.
- Houghton, W., “Notices of Fungi in Greek and Latin Authors”, en *Annals and Magazine of Natural History Series*, 5 (15): 22-49, 1885.
- Lange, M., “Dispositions and Scientific Explanation”, *Pacific Philosophical Quarterly*, 75: 108-132, 1994.
- , “Inductive Confirmation, Contrafactual Conditionals, and Laws of Nature”, *Philosophical Studies*, 85 (1): 1-36, 1996.

- Langton, C. G., "Artificial Life", en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, Redwood City, 1989.
- , "Introduction", en C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Fanner y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1991.
- , "Studying Artificial Life with Cellular Automata", *Physica D*, 22: 147, 1986.
- Large, E. C., *The Advance of the Fungi*, Dover, Nueva York, 1962.
- Lederberg, J., "Exobiology: Approaches to Life beyond the Earth", *Nature*, 132: 394, 1960.
- Levy, S., *Artificial Life*, Vintage, Nueva York, 1992.
- Medawar, P. B., y J. S. Medawar, *The Life Science*, Harper & Row, Nueva York, 1977.
- Penrose, L. S., "Self-reproducing Machines", *Scientific American*, 200 (6): 105-113, 1959.
- Pirie, N. W., "The Meaninglessness of the Terms 'Life' and 'Living'", en J. Needham y D. E. Green (comps.), *Perspectives in Biochemistry*, Cambridge University Press, Cambridge, 1938, pp. 11-22.
- Ramsbottom, J., "The Expanding Knowledge of Mycology since Linnaeus", *Proceedings of the Linnean Society*, 151: 311-317, 1938/1939.
- , "The Fungus Stone", en *Proceedings of the Linnean Society*, 144: 76-79, 1931/1932.
- Ray, T. S., "An Evolutionary Approach to Synthetic Biology", *Artificial Life*, 1: 185, 1994.
- Reynolds, C., "Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavior Model", *Computer Graphics*, 21 (4): 25-34, 1987.
- Rosenberg, A., *The Structure of Biological Science*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- Scott, A., *Origen and the Life of the Stars: A History of an Idea*, Oxford University Press, Oxford, 1991.
- Sober, E., "Evolution, Population Thinking, and Essentialism", en M. Ereshefski (comp.), *The Units of Evolution*, MIT Press/Bradford Books, Cambridge, 1992, p. 353.
- , "Learning from Functionalism — Prospects for Strong Artificial Life", en C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1991, pp. 749-765.
- , *Philosophy of Biology*, Westview, Boulder, 1993. [Versión en español: *Filosofía de la biología*, Alianza, Madrid, 1996.]
- Spafford, E., "Computer Viruses as Artificial Life", *Artificial Life*, 1: 249-265, 1994.
- Taub, L., *Ptolemy's Universe*, Open Court, La Salle, 1993.
- Wolfram, S., "Undecidability and Intractability in Theoretical Physics", *Physical Review Letters*, 54: 735-738, 1985.

Margaret A. Boden

XVIII. LA VIDA ALIENÍGENA: ¿CÓMO SABRÍAMOS?*

INTRODUCCIÓN

Para identificar la vida alienígena tendríamos que saber qué entendemos por *alienígena* y qué entendemos por *vida*. Consideremos primero el primer término. Veríamos la vida como alienígena, pienso, si se descubriera en otro planeta, si su bioquímica fuera fundamentalmente distinta a la de la Tierra, o si se hubiera generado artificialmente gracias a las investigaciones de la inteligencia artificial/vida artificial (¿acaso los robots?).

En particular, la veríamos como alienígena si consistiera en organismos puramente *virtuales*: animales que sólo existieran en una memoria computacional y sólo se manifestaran en una pantalla udv. Casi todas las referencias a la vida, alienígena o no, asumen la existencia material de un objeto físico (un “cuerpo”) —tal vez microscópico—. Pero esto no es aplicable a los organismos exclusivamente virtuales. La pretensión de que tales animales cibernéticos pudieran considerarse realmente como entes vivientes es la pretensión de que la “vida artificial fuerte” es posible. (La vida artificial fuerte/dura [*strong ALife*] se llama así por analogía con la inteligencia artificial fuerte/dura [*strong AI*]).¹ Y no es posible evaluar esta pretensión sin considerar qué entendemos por *vida*, en el sentido amplio del término.

Es ésta una cuestión notoriamente difícil. En este trabajo me concentraré en uno de los criterios de la vida que comúnmente se cita: el metabolismo. Como veremos, el metabolismo (en el sentido biológico) es una especie de afinación bioquímica. De hecho, el metabolismo caracteriza toda la vida conocida, tanto efectiva como necesariamente. Si esto es cierto, entonces a un ente que no puede metabolizar no es posible considerarlo un ente viviente. Por lo tanto, si los entes virtuales no poseen este tipo de afinación, no se les puede considerar entes *vi-vientes*. Aunque no conocemos los entes maravillosos que acaso habiten en el rei-

* Este capítulo apareció originalmente en *International Journal of Astrobiology*, 2 (2): 121-129, 2003.

¹ J. R. Searle, “Minds, Brains, Programs”, *Behavioral Brain Science*, 3: 427-457, 1980.

no de la vida alienígena, podemos estar seguros de que entre ellos no se encuentran los organismos cibernéticos.

A fin de abordar estas cuestiones, debemos examinar con cuidado qué significa exactamente el “metabolismo”. La primera cosa que hay que advertir es que al metabolismo concierne *la función de la materia/energía en los organismos considerados como entes físicamente existentes*. No es un concepto funcionalista abstracto, divorciado de las realidades materiales específicas. En cambio, los demás aspectos que típicamente se mencionan en las definiciones de la vida —la autoorganización, la emergencia, la autonomía, el crecimiento, el desarrollo, la reproducción, la adaptación, la reacción y (a veces) la evolución— pueden explicarse con base en conceptos funcionalistas, informacionales.

El concepto medular de la autoorganización, por ejemplo, involucra la emergencia (y mantenimiento) del orden, a partir de un origen menos ordenado. No sólo concierne al cambio superficial, sino al desarrollo estructural fundamental. El desarrollo es espontáneo, o autónomo, en el sentido que resulta del carácter intrínseco del sistema (con frecuencia en interacción con el medio ambiente), más que un desarrollo impuesto por alguna fuerza externa o por un creador.

También se pueden definir de manera abstracta los otros elementos de la serie. Así, la emergencia es la aparición de propiedades nuevas que parecen (por lo menos a primera vista) inexplicables en relación con las primeras etapas o los componentes primarios. El crecimiento significa un aumento cuantitativo; el desarrollo, un cambio estructural autónomo que produce un mayor grado de ordenamiento; la adaptación, una mejor reacción ante el medio ambiente mediante el cambio estructural y conductual (que puede ser hereditario); la reproducción, una autocopia; y la evolución, un cambio adaptativo mediante la reproducción, la herencia, la variación y la selección.

El metabolismo es un concepto problemático para la vida artificial dura porque no se puede definir de esta manera. La vida artificial fuerte es una empresa funcionalista; es decir, los investigadores de la vida artificial fuerte típicamente consideran los fenómenos vitales en relación con la información y la computación, y no la materia o la energía. Por ejemplo, John von Neumann definió los requisitos generales de la reproducción con base en la lógica computacional, señalando que los errores de copia (una noción informacional) podían producir la evolución adaptativa.² Similarmente, en la primera conferencia que caracterizó la “vida artificial” como un proyecto unitario, Christopher Langton dijo: “La

² A. W. Burks, *Theory of Self-reproducing Automata*, University of Illinois Press, Urbana, 1966; A. W. Burks, *Essays on Cellular Automata*, University of Illinois Press, Urbana, 1970.

meta última de ALife consiste en extraer la estructura lógica de los sistemas vivientes”.³

Claro es que ninguno de los investigadores de ALife duda que los entes vivos sean entes materiales de algún tipo. Langton lo explicita en su explicación de que la vida es “una propiedad de la organización de la materia, más que una propiedad de la materia que se encuentra organizada de esta manera”.⁴ Por lo tanto, hasta aquí la respuesta a la pregunta “¿son esenciales para la vida la materia y la energía?”; al parecer sería un “sí” cauteloso. En alguna forma, un cierto tipo de materia se organiza. Pero la naturaleza de esta materia es filosóficamente irrelevante para el sistema físico, en cuanto ente vivo. Podría, por ejemplo, ser de silicio la materia. Y nada se puede (ni es necesario) decir sobre el tipo general de procesos fisicoquímicos que se organizan de manera pertinente.

Sin embargo, Langton⁵ también dice: “La meta última del campo de la vida artificial sería la creación de la ‘vida’ en algún otro medio, idealmente [*sic*] un medio virtual en que la esencia de la vida se haya abstraído de los detalles de su implementación en cualquier modelo en particular”.

Este tipo de vida habitaría en el espacio cibernético, un mundo virtual de procesos informacionales arraigado en las computadoras. Los animales virtuales se definirían en forma puramente informacional, como cadenas de bits o de instrucciones computacionales. Pero su actividad (la ejecución de las instrucciones), sin la cual ni siquiera se podían considerar como posibles organismos vivos, requeriría la computadora. Así, al igual que los animales biológicos, tendrían una existencia física: el arraigo material, en la memoria de la computadora, del procesamiento de la información. La “materia organizada” sería la sustancia con la cual las computadoras se construyen —la cual podría ser muy diversa—. Como da a entender claramente el término de Langton, “idealmente”, las moléculas y procesos fisicoquímicos implicados no serían importantes para el funcionalista de ALife. Las únicas propiedades interesantes de los animales virtuales, en cuanto entes vivos, serían las abstractas, informacionales.

El planteamiento de Langton se cuestiona incluso por muchos investigadores de la vida artificial, de manera que su “meta última” no puede adscribirse al campo de la vida artificial en general. (Es decir, que ALife en conjunto no podría descartarse simplemente porque se rechazara la posibilidad de la vida artificial

³ S. Levy, *Artificial Life: The Quest for a New Creation*, Pantheon, Nueva York, 1992, p. 113.

⁴ C. G. Langton, “Artificial Life”, en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, Redwood City, 1989, p. 2; artículo reproducido, con correcciones, en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Oxford, 1996, pp. 39-94.

⁵ C. G. Langton, “Studying Artificial Life with Cellular Automata”, *Physica D*, 22: 1120-1149, 1986.

fuerte; lo mismo se puede decir de la vida artificial suave, cosa que Searle acepta.) Pero Langton no es el único que hace este tipo de planteamientos.

Uno de los investigadores de ALife que está de acuerdo con él es Thomas Ray, un ecologista que se especializa en las selvas tropicales. Ray va aún más lejos que Langton: él cree que ya ha logrado implementar formas primitivas de vida verdadera, aunque virtual. Sus modelos computacionales de la coevolución en el mundo virtual “Tierra” han resultado en la fundación de la “Reserva Digital”.⁶ Éste es un espacio de memoria virtual que se extiende a través de una red mundial de computadoras, lo cual permite que la capacidad ociosa de éstas pueda utilizarse. Tierra es un ejemplo (otro se describe más adelante en el apartado sobre el metabolismo fuerte y la vida artificial fuerte) de las investigaciones de ALife que sus partidarios describen como la creación de formas de vida reales, aunque primitivas.

Las criaturas (palabra utilizada por Ray) que habitan la Reserva Digital, como los que habitan Tierra, son cadenas de códigos computacionales autorreplicadores. Son capaces de acoplarse (intercambiar instrucciones genéticas), de mutar, de competir y de evolucionar. Por ejemplo, son capaces de crear evolutivamente algunas cadenas-código que carecen de las instrucciones responsables de la autorreplicación pero que pueden “parasitar” el código de otras criaturas a fin de replicarse a sí mismas. Esta es una estrategia evolutiva exitosa porque la adecuación se define en relación con la capacidad de acceso a la memoria de la computadora —y una “especie” con cadenas más cortas puede acomodar más individuos en un espacio de memoria dado.

Las criaturas liberadas en la Reserva Digital van de una computadora a otra en su búsqueda de espacio de memoria no utilizado. (Puesto que se implementaron en una computadora virtual, la cual se simuló por una computadora real, las criaturas de *software* no pueden “escaparse” ingresando en computadoras que no pertenecen a la red de la Reserva Digital, y tampoco contaminar la actividad cotidiana de las que sí forman parte de ésta.) Ray insiste en que la Reserva Digital es un experimento sobre la creación de nuevas formas de vida.

Quienes, como Langton y Ray, ven en la vida artificial fuerte una posibilidad real, defienden su planteamiento contraintuitivo mediante dos planteamientos interconectados. Primero, que la virtualidad tiene límites: las computadoras, al fin y al cabo, son cosas materiales y necesitan energía para funcionar. Segundo, que los criterios de la vida son esencialmente abstractos, o funcionalistas, y nada di-

⁶ T. S. Ray, “An Approach to the Synthesis of Life”, en C. G. Langton *et al.* (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 371-408; T. S. Ray, “An Evolutionary Approach to Synthetic Biology: Zen and the Art of Creating Life”, *Artificial Life*, 1: 179-210.

cen sobre la naturaleza (desde luego necesaria) de su base material. Para demostrar que se equivocan, hay que demostrar que por lo menos uno de estos planteamientos es falso.

Siendo indiscutible el primer planteamiento, hay que enfocar el segundo. Antes sugerí que todos salvo uno de los elementos en la típica lista de las propiedades vitales pueden considerarse conceptos abstractos, informacionales. La única obvia excepción es el metabolismo. Un partidario de la vida artificial fuerte por lo tanto debe demostrar que los sistemas virtuales pueden metabolizar auténticamente. La estrategia alternativa —sacar al metabolismo de la lista de los criterios— se discute aquí, y se rechaza, más adelante.

En la siguiente parte de este trabajo, distingo tres sentidos del metabolismo. Los primeros dos (y más débiles) se encuentran en los argumentos de algunos de los partidarios de la vida artificial fuerte, ya que en cada una de estas interpretaciones algunos artefactos de la vida artificial se podrían considerar como auténticamente vivos. El tercero, y más fuerte, el sentido es no. Se deriva de la biología, proponiendo una especie de identidad corporal que no llegan a tener las criaturas virtuales (como alegaré en el apartado sobre el metabolismo fuerte y la vida artificial fuerte).

Independientemente de las cuestiones relacionadas con la vida artificial, el sentido fuerte del metabolismo es más interesante de lo que a veces se piensa. Además de referirse a los procesos bioquímicos (sean los que sean) que sustentan el crecimiento y la función de un organismo, denota varias propiedades generales que estos procesos *necesariamente* deben poseer. La vida en Marte o en Alfa Centauri, por lo tanto, también tendría que tener estas propiedades.

TRES CONCEPTOS DEL METABOLISMO

¿Qué es exactamente el metabolismo? Éste ubica la vida en el mundo físico (nada de ángeles y cabezas de alfileres). Pero no denota meramente la materialidad. Un volcán es una cosa material y también lo es un grano de arena, pero ninguno de los dos metaboliza. Más bien, el metabolismo —en el sentido mínimo del término— denota la dependencia en la energía como una condición para la existencia y la persistencia de un ente viviente.

Si sólo se tratara de la dependencia en la energía, entonces la vida artificial fuerte sería posible, puesto que la vida virtual satisface este criterio, cosa que tanto Langton como Ray señalarían rápidamente. La vida artificial fuerte depende

totalmente de la energía. Es necesaria la energía eléctrica para ejecutar los procesos de información que definen a “esta” o a “esa” criatura. Si se desenchufan las computadoras, si se detiene el flujo de los electrones en su interior, entonces el espacio cibernético no sólo queda vacío, sino destruido. La vida artificial fuerte, habiendo existido una vez, habría muerto.

Sin embargo, el término “metabolismo” normalmente se usa para dar a entender algo más que la dependencia en la energía. Es posible distinguir otros dos sentidos del término, cada cual asociado con las nociones de la utilización, recolección, gasto, almacenamiento y administración de la energía. Estas actividades —una especie de “afinamiento”— son características de la vida. (Los volcanes activos tienen una enorme cantidad de energía, sin la cual no existirían. Pero no la utilizan ni la almacenan, y ni siquiera la gastan, excepto en un sentido débilmente metafórico —y ciertamente no la administran—.)

El segundo (y más fuerte) sentido del metabolismo suplementa la idea de la mera dependencia en la energía con la idea de los paquetes de energía individuales que se usan para alimentar las actividades de la criatura, dando por descontado el hecho de su existencia física. A cada sistema viviente se le asigna, o cada sistema recoge para sí mismo, una cantidad finita de energía. Ésta se va gastando en sus diversas actividades. Cuando la energía del individuo se acaba, ya sea porque ya no hay más en el medio ambiente o porque el sistema ya no puede recogerla o utilizarla, la actividad que depende de la energía cesa y el organismo muere.

Algunas de las investigaciones más tempranas en el campo de ALife (hacia mediados del siglo pasado) ya manejaban la idea —y la realidad— de los paquetes de energía individuales. Las “tortugas” mecánicas de Grey Walter,⁷ Elmer y Elsie, eran simples robots que usaban su energía para actuar físicamente. Se movían alrededor del piso mediante la electricidad, deteniendo sus actividades de vez en cuando para recargar sus baterías. La segunda definición del metabolismo también abarcaría los más recientes robots de ALife (comparables, *grosso modo*, a las tortugas de Grey Walter), algunos de los cuales incluso tienen distintas fuentes de energía para diferentes tipos de actividades. Por tanto, a tales robots se les podría llamar vivientes de acuerdo con este (segundo) criterio.

Pero la cuestión de los robots de ALife no atañe a la cuestión de si es posible la vida artificial fuerte, ya que la “vida artificial fuerte” no se relaciona indiscriminadamente con todos los artefactos de ALife, incluidos los robots y los sistemas

⁷ W. Grey Walter, “An Imitation of Life”, *Scientific American*, 182: 42-45, 1950.

físicos basados en sistemas bioquímicos exóticos. AtaÑe más bien a las criaturas virtuales que habitan mundos virtuales.

Como dijimos antes, las criaturas virtuales sólo existen en la memoria de la computadora, apareciendo en la pantalla UVD, donde un observador los capta. Sólo “existen” en el sentido de que consisten en una particular distribución (que acaso varía continuamente) de cargas eléctricas en diversas ubicaciones (acaso muy desperdigadas) dentro de la máquina (estas ubicaciones pueden cambiar, ya que las instrucciones pertinentes se intercambian de una parte de la máquina a la otra para su ejecución y almacenamiento). En este sentido, pues, se puede decir que tienen existencia física. Pero esto no quiere decir que tengan un cuerpo (véase *infra*). Y tampoco que almacenen y administren energía real (lo cual se requiere en el segundo sentido del metabolismo) a fin de llevar a cabo sus actividades y continuar con su existencia física.

Muchas criaturas virtuales se generan por sus creadores humanos como simulaciones computacionales de la vida real. Es decir, su conducta en la pantalla UVD (manifestación causada por los procesos electrónicos subyacentes en la memoria computacional) tiene algún tipo de relación sistemática o isomorfa con ciertos aspectos de los organismos vivientes. Y algunas simulan el metabolismo (en el segundo sentido), al menos en forma tosca.

Son muchos los programas que simulan animales con niveles de energía distintos que aumentan con la alimentación y el descanso, y disminuyen con las actividades, tales como la búsqueda de alimentos, las peleas y el apareamiento. Algunos de estos programas incluso asignan distintos subpaquetes de energía a diferentes actividades, de modo que en un momento dado una criatura podría tener la energía para aparearse, pero no para luchar. (Para un ejemplo muy temprano, donde una rata simulada tiene que elegir entre buscar el calor o buscar la comida, véase J. E. Doran.)⁸

Sin embargo, en estos casos los “paquetes” y “subpaquetes” no son auténticas fuentes de energía identificables, o depósitos de energía, sino sus simulaciones. En cualquier momento, el programa le puede ordenar a la criatura que busque alimentos, pero esto solamente significa que cierta variable numérica ha caído debajo de un valor de umbral, activando así las instrucciones para la búsqueda de alimentos. Sin embargo, esto se deriva, mediante un enchufe eléctrico o una batería, de la fuente de energía general de la cual depende el programa entero pasivamente. Si el programa simula más de una criatura, esta fuente de energía está

⁸ J. E. Doran, “Experiments with a Pleasure-Seeking Automaton”, en D. Michie (comp.), *Machine Intelligence III*, Edinburgh University Press, Edimburgo, 1968, pp. 195-216.

igualmente disponible para todas, de acuerdo con las pertinentes instrucciones del programa. Se logra el metabolismo en el primer sentido, pero en el segundo solamente se simula.

Supongamos que fuentes de energía separadas, distintos paquetes de energía real, se proporcionaran (en la computadora) a cada una de las criaturas simuladas. ¿Entonces qué pasaría? Se habría satisfecho el segundo sentido del metabolismo. Si nuestro concepto de la vida abarcara este sentido del término, sería concebible la vida artificial fuerte.

No obstante, hay que advertir dos aspectos importantes de la segunda definición, tal como se expuso antes. Primero, se refiere a la “existencia física” de la criatura, no al “cuerpo” de la criatura —ni siquiera a que sea un sistema físico “unitario”—. Segundo, y de manera crucial, se refiere al hecho de que esa existencia física se da por descontada.

Es claro, pues, que el segundo sentido del metabolismo no es el concepto que el biólogo tiene de él. Ningún biólogo ignora el hecho de que la existencia física de un organismo consiste en un sistema material integrado, un cuerpo. (Las aparentes excepciones incluyen los mohos mucilaginosos, en cuyo ciclo vital el organismo multicelular se divide en muchas “amibas” unicelulares que posteriormente se funden para formar una criatura multicelular. Pero en cada etapa, incluso en la amibica, existe un sistema material integrado, o varios de éstos. No es importante aquí que se prefiera ver o no una estructura multicelular reconstituida como el “mismo” organismo o cuerpo.)

Además, ningún biólogo da por sentada la existencia del cuerpo de un organismo. Al contrario, uno de los principales enigmas de la biología consiste en explicar cómo los cuerpos vivientes se forman y cómo se mantienen hasta que el organismo muere. Por lo tanto requerimos una tercera y todavía más fuerte definición del metabolismo si queremos captar lo que los biólogos comúnmente entienden por el término.

El tercer sentido del metabolismo se relaciona con el uso y la administración de la energía para la construcción y el mantenimiento corporales, así como para la conducta. El metabolismo, en otras palabras, es más que la mera autoorganización material. Ésta aparece (por ejemplo) en la reacción Belousov-Zhabotinsky, donde la mezcla de dos líquidos produce la emergencia espontánea del orden (espirales y círculos visibles) —pero nadie hablaría de la vida en este caso: no participan en él las demás propiedades vitales listadas al inicio de este capítulo—.

Más bien, el metabolismo es un tipo de autoorganización material que, a diferencia de la reacción Belousov-Zhabotinsky, implica la utilización autónoma de

la materia y la energía en la construcción, desarrollo y mantenimiento de la estructura corporal de un ente viviente. (Es conveniente en esta explicación aplicar el término de “cuerpo” tanto a las plantas como a los animales.)

La materia es necesaria para la estructura de que está hecho el cuerpo. Y la energía es necesaria para organizar esta materia, así como la nueva materia que el cuerpo se apropie en el curso de su existencia, formando una organización cuya existencia perdure a pesar de los cambios en las condiciones externas. El metabolismo, en este sentido fuerte, tanto genera como mantiene la distinción entre la materia física del organismo individual y la materia física de otras cosas, ya sean éstas vivientes o no.

El metabolismo en este tercer sentido *necesariamente* involucra procesos bioquímicos estrechamente interconectados. En otras palabras, involucra necesariamente una especie de “afinación” muy precisa.

Para esto hay diversas razones interconectadas. Un organismo multicelular debe crecer a veces y un organismo unicelular puede crecer a veces. (Asumo que los organismos multicelulares empiezan como organismos unicelulares; normalmente, éstos se dan en la forma de una sola espora o un solo huevo fertilizado, pero los mohos mucilaginosos multicelulares “crecen” mediante la agregación de muchos organismos unicelulares.) E incluso un organismo unicelular debe (a veces) reparar los daños que experimenta. Ya que la materia viviente no puede crearse de la nada, el crecimiento y la reparación requieren que las nuevas moléculas se sinteticen por el organismo —moléculas que por su parte constituyen el organismo—. Además, el sistema viviente (sujeto, como todas las cosas físicas, a la segunda ley de la termodinámica) continuamente tiende al desorden y a la disipación de la energía. Por tanto, el metabolismo implica necesariamente el consumo de la energía del medio ambiente.

Los entes vivientes más sencillos que uno pueda imaginar podrían tomar su energía directamente del medio ambiente cuando la necesitaran. (Tales entes sólo cumplirían con el primer sentido del metabolismo, no con el tercero.) Es posible que los organismos vivientes más primitivos lo hicieran así. Pero esto los haría vulnerables a situaciones en que no dispusieran directamente de “nueva” energía. (Análogamente, las computadoras que dependen de un enchufe eléctrico son vulnerables a los cortes de energía.) Si por casualidad el organismo fuera capaz de almacenar incluso pequeñas cantidades de energía restante para su utilización posterior, su viabilidad —y adecuación darwiniana— se incrementaría enormemente. Una vez que la evolución se iniciara, este hecho se reflejaría en la evolución del metabolismo.

Inevitablemente, pues, todos los sistemas metabólicos (aparte de los más primitivos, acaso) no sólo deben intercambiar energía con el mundo externo, sino también ser capaces de administrar la energía interna. La energía restante se almacena para evitar la dependencia en la recolección directa de la energía. Si (lo cual es probable) la energía recolectada no se puede almacenar convenientemente en su forma inicial, debe transformarse en otra cosa. En otras palabras, los organismos vivos tienen que ser capaces de transformar la energía externa en alguna sustancia (un “recurso”) que pueda utilizarse para proporcionar energía a los muchos y diversos procesos que tienen lugar dentro del organismo. Es ésta la “primera ley fundamental de la bioenergética”.

Aparentemente, la vida terráquea sólo utiliza tres recursos de energía transformable —uno de los cuales es el ATP o adenosina trifosfato.⁹ El ATP *podría* deberse a un accidente evolutivo, habiendo aparecido (gracias a la mutación) muy al principio de la evolución para permanecer desde entonces. En otras palabras, no se sabe (me dicen mis informantes) si alguna otra sustancia *podría*, en principio, desempeñar el mismo papel. Si no fuera así, entonces la vida “alienígena” en Marte también se basaría en el ATP. Si así fuera, entonces acaso no se basaría en el ATP. Indudablemente mostraría una afinación metabólica. Pero las sustancias químicas que intervinieran en los procesos biofísicos medulares serían diferentes.

Se requieren intercambios de energía adicionales, puramente internos, para transformar inicialmente la energía recolectada en sustancias que se puedan almacenar, y luego, tras la disgregación de las sustancias, que se puedan utilizar. Estos procesos muy probablemente producen sustancias desechables que tienen que ser neutralizadas y/o excretadas mediante otros procesos todavía. En una palabra, el metabolismo necesariamente implica un buen equilibrio entre el anabolismo y el catabolismo, y requiere una bioquímica compleja a fin de llevar a cabo estas funciones vitales.

El mantenimiento corporal es normalmente continuo. Pero los procesos metabólicos subyacentes son más activos en ciertos momentos —del día, año o ciclo vital— que en otros. A veces se desarrollan con mucha más lentitud o (acaso) se suspenden temporalmente. En los animales que hibernan, por ejemplo, el metabolismo se reduce al mínimo: la respiración y la excreción ocurren muy lentamente. Incluso en el caso de las semillas o esporas que se han mantenido congeladas o almacenadas en tumbas durante siglos, cierta mínima actividad metabólica ha podido conservarse.

⁹ F. Moran *et al.*, “Further Steps towards a Realistic Description of the Essence of Life”, en C. G. Langton y T. Shimohara (comps.), *Artificial Life V*, MIT Press, Cambridge, 1997, § 4.2.

¿Pero y si no hubiera sido así? No se sabe con claridad si este concepto fuerte del metabolismo implica que el automantenimiento activo deba ser absolutamente continuo y que no permita ninguna interrupción. Si las investigaciones bioquímicas hubieran de demostrar que el metabolismo se interrumpe ocasionalmente en condiciones muy anormales (como el congelamiento), así sea. De hecho, ya se habla de la “animación suspendida”: una espora podría estar actualmente inactiva, pero si conserva el potencial para metabolizarse en condiciones adecuadas, no la vemos como una espora “muerta”.

EL METABOLISMO FUERTE Y LA VIDA ARTIFICIAL FUERTE

El apartado anterior expuso que todos los sistemas de la vida artificial satisfacen el primer sentido del metabolismo y que ciertos tipos de simulaciones de la vida artificial acaso podrían satisfacer el segundo sentido. Pero en cuanto al tercero y más fuerte sentido del metabolismo, ¿qué sucede? ¿Podría encontrarse éste en las criaturas de la vida artificial, de manera que pudiéramos verlas como entes vivientes? Si así fuera, ¿serían estas criaturas necesariamente unos robots, o podrían verse como virtualmente vivientes?

Los actuales robots de la vida artificial no se ajustan a este último criterio. Son típicamente robots “situados” que se han construido (o desarrollado evolutivamente) para responder directamente a señales del medio ambiente. Algunos no se parecen en absoluto a las formas de vida.¹⁰ Otros se parecen físicamente a los insectos y su sistema de control parece derivarse directamente de la neuroanatomía de los insectos.¹¹

Ciertamente, tales robots en un sentido significativo son autónomos, especialmente cuando se les ha hecho evolucionar automáticamente a través de muchos miles de generaciones.¹² Y es indudable que consumen energía real cuando circulan en su medio ambiente físico. A diferencia de los robots clásicos, se encuentran insertados en el mundo, en el sentido de que reaccionan directamente ante los fenómenos del mundo, en vez de reaccionar mediante un complejo

¹⁰ D. Cliff, I. Harvey y P. Husbands, “Explorations in Evolutionary Robotics”, *Adaptive Behavior*, 2 (1): 73-110, 1993.

¹¹ R. A. Brooks, “Intelligence without Representation”, *Artificial Intelligence*, 47: 139-159, 1991; R. D. Beer, *Intelligence as Adaptive Behavior: An Experiment in Computational Neuroethology*, Academic Press, Nueva York, 1990.

¹² M. A. Boden, “Life and Cognition”, en J. Branquinho (comp.), *The Foundations of Cognitive Science at the End of the Century*, Oxford University Press, Oxford, 2000, pp. 11-22.

modelo interno del mundo. Pero el hecho de que estén insertados en el mundo no requiere que estén (verdaderamente) incorporados en el mundo. Anteriormente alegué que un cuerpo no es solamente un pedazo de materia, sino el aspecto físico de un sistema viviente, creado y mantenido como una unidad funcional por un metabolismo autónomo. Si esto es cierto, entonces los robots no tienen cuerpo.

Es concebible que algunos futuros robots de ALife puedan llegar a ser sistemas materiales autorregulados con base en cierta bioquímica conocida o exótica. No se sabe, sin embargo, hasta qué punto su bioquímica pudiera ser exótica.

En principio, no sería necesario que ésta se base en el carbono. Sin embargo, acaso el carbono sea el único elemento capaz de formar esa amplia gama de estructuras moleculares estables, aunque complejas, que al parecer son necesarias para la vida. Eric Drexler¹³ dice que incluso las bioquímicas totalmente alienígenas que no se basaran en el carbono tendrían que tener en común con la nuestra ciertas propiedades *relacionales*. Tendrían que utilizar una difusión general, no vías exclusivas para moléculas específicas; un acoplamiento molecular basado en la forma, no un ensamblaje mediante el posicionamiento preciso; una estructura topológica, no geométrica; y unos componentes adaptativos, no inertes. De hecho, Drexler propone una caracterización funcionalista de la bioquímica (la química del metabolismo) que acaso podría ejemplificarse de muchas maneras. El metabolismo también ha sido caracterizado con base en términos termodinámicos mucho más abstractos.¹⁴

Sea cual sea su caracterización, los artefactos basados en bioquímicas exóticas bien podrían merecer la calificación de vida: no la vida artificial fuerte confinada en el ciberespacio, sino la vida real, metabolizadora. Actualmente no hay nada en el campo de la vida artificial que ofrezca la promesa de tales criaturas. Sin embargo, es concebible que los bioquímicos humanos ya hayan creado formas de vida artificiales —aunque no robots— sin darse cuenta de ello, creando involuntariamente “las condiciones en las cuales [los sistemas metabolizadores] se forman a sí mismos”.¹⁵ Sea como fuere, tales artefactos son irrelevantes en nuestra discusión. Si los nuevos robots y las nuevas bioquímicas llegaran a construirse o a evolucionar artificialmente, se los consideraría como ALife *lograda*,

¹³ K. E. Drexler, “Biological and Nanomechanical Systems: Contrasts in Evolutionary Complexity”, en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, op. cit., pp. 501-519.

¹⁴ A. Moreno y K. Ruiz-Mirazo, “Metabolism and the Problem of its Universalization”, *Biosystems*, 49: 45-61, 1999.

¹⁵ M. Zeleny, “Self-organization of Living Systems: A Formal Model of Autopoiesis”, *International Journal of General Systems*, 4: 27, 1977.

más que como ALife *fuerte*. Por lo tanto sigue siendo debatible la cuestión de si el tercer sentido del metabolismo elimina la posibilidad de la vida artificial fuerte.

Ya vimos que el metabolismo, en este sentido, implica la incorporación material —la incorporación, no la mera existencia física—. Requiere también un complejo equilibrio de cierto tipo de procesos bioquímicos definibles. No puede simularse adecuadamente por un sistema que recoja energía libremente mediante un enchufe o una batería, o incluso mediante la asignación de “envíos” específicos de energía computacional a funciones distintas dentro de un programa. Las criaturas virtuales podrían poseer paquetes de energía individuales, así como una especie de administración de la energía, pero éstos serían tenues simulaciones de los procesos reales. Aun los modelos “bioquímicos” de ALife, si se encuentran confinados en el espacio cibernético, se excluyen del reino de los entes vivientes.

Esto nos prohíbe ver como seres verdaderamente vivientes a una “especie” que ha creado la vida artificial y que recientemente ha despertado mucho interés. Su principal diseñador, Steve Grand, insiste en que los miembros virtuales de esta especie son formas de vida primitivas.¹⁶ Me estoy refiriendo a los seres cibernéticos de *Creatures*, un juego computacional o, más precisamente, un mundo computacional construido con la tecnología de ALife.¹⁷ Es un mundo virtual mucho más complejo que el de otros “animales” computarizados, como *Dogz*, *Catz* y la criatura electrónica Tamagochi, cuyo propietario debe ejercitar, lavar y poner a dormir. A nosotros lo que aquí nos interesa especialmente es que *Creatures* incluye un (tosco) modelo del metabolismo, así como de la conducta.

El usuario humano de *Creatures* puede incubar, nutrir, ayudar, enseñar y hacer evolucionar a pequeñas criaturas computacionales aparentemente simpáticas y cariñosas, los llamados *norns*. Hasta 10 *norns* pueden coexistir en el mundo virtual (el perfeccionamiento de la memoria computacional permitirá poblaciones mayores en el futuro), pero incluso una sola de estas criaturas mantiene muy ocupado al usuario.

Una de sus tareas consiste en que todos los *norns* puedan encontrar comida cuando tengan hambre y en ayudarlos a aprender a comer los alimentos apropiados y a evitar los alimentos venenosos. Otra consiste en enseñarles a responder a sencillas indicaciones lingüísticas (nombres propios, categorías y órdenes), dándoles diferentes instrucciones a cada uno de los *norns*. Aun otra consiste en enseñarles a cooperar entre sí de diferentes maneras. Además, el usuario debe protegerlos —y

¹⁶ Steve Grand, comunicación personal.

¹⁷ S. Grant, D. Cliff y A. Malhotra, *Creatures: Artificial Life Autonomous Software Agents for Home Entertainment*, Research Report CSRP 434, Brighton University of Sussex School of Cognitive and Computing Sciences, 1996.

enseñarles a protegerse a sí mismos— de los *grendels*, depredadores que también existen en ese mundo virtual. El humano puede crear evolutivamente nuevos norns que combinen aspectos deseados de apariencia y conducta, ya que el apareamiento de dos individuos produce una recombinación (aleatoria) de sus “genes”.

Los genes de un norn determinan su apariencia externa y el estado inicial de la red neural de su “cerebro” (al nacer, 1 000 neuronas y 5 000 sinapsis); las conexiones específicas se modifican por la experiencia del individuo. Los genes también determinan su “metabolismo” idiosincrásico. En la conducta de cada individuo influye significativamente su bioquímica (simulada). Se modelan aspectos globales, tales como el flujo informativo en el cerebro, las modulaciones hormonales en el cuerpo, el metabolismo básico del norn, y el estado de su sistema inmunológico.

La bioquímica virtual se define con base en cuatro tipos de objetos bioquímicos. Primero, hay 255 “sustancias químicas”, cada una de las cuales puede tener diferentes concentraciones. (Éstas no se identifican con moléculas bioquímicas específicas: las funciones de las 255 sustancias se asignan aleatoriamente.) Segundo, se representan varias “reacciones” bioquímicas. Éstas abarcan la fusión, la transformación, la descomposición y catálisis exponenciales (de la transformación y de la descomposición). Tercero y cuarto, hay un número de sustancias químicas “emisoras” y “receptoras” que representan diversos procesos en el cerebro y en el cuerpo (por ejemplo, la actividad de los órganos sensoriales). En conjunto, estas categorías bioquímicas (abstractas y funcionales) se utilizan para construir vías de retroalimentación que modelan fenómenos como el aprendizaje reforzado, la reducción del impulso, la atrofia sináptica, el metabolismo de la glucosa, las toxinas y la producción de anticuerpos.

Esta arquitectura general es potencialmente significativa para los futuros avances teóricos en los modelos de ALife. Su complejidad, todavía no explotada, que incluye la capacidad para modelar aspectos globales del procesamiento de la información, es muy prometedora. Por ejemplo, podría desarrollarse mediante la incorporación de ciertas ideas recientes de la vida artificial relacionadas con la arquitectura computacional que subyace en la motivación y en la emoción,¹⁸ de las cuales sólo hay modelos preliminares.¹⁹

¹⁸ A. Sloman, “Motives, Mechanisms, Emotions”, en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Intelligence*, Oxford University Press, Oxford, 1990, pp. 231-247; L. P. Beaudoin, “Goal-Processing in Autonomous Agents”, tesis de doctorado, School of Computer Science, University of Birmingham, Birmingham, 1994; I. P. Wright *et al.*, “Towards a Design-based Analysis of Emotional Episodes”, *Philosophy, Psychiatry and Psychology*, 3 (2): 101-137, 1996.

¹⁹ I. P. Wright, *Emotional Agents*, tesis de doctorado, School of Computer Science, University of Birmingham, Birmingham, 1997.

En la actualidad, sin tales agregaciones *Creatures* es ya un programa indudablemente seductor. Todos los usuarios, excepto los más reacios, espontáneamente ven a los norns como si estuvieran vivos, y algunos lamentan la muerte de ciertos individuos (cada uno de los cuales posee una “vida” propia) a pesar de que puedan crear otros pulsando un botón.

Con todo, *Creatures* es una simulación de la vida, no una realización de la vida. No posee procesos químicos reales; el sistema ni siquiera es un modelo químicamente posible de procesos moleculares específicos. Además, el metabolismo simulado se ocupa en controlar la conducta de los norns, no en construir o mantener su estructura corpórea (y aún menos en regular la subyacente existencia física electrónica de la criatura computacional).

Los “alimentos” y los “venenos” se asocian con metabolitos simulados y con procesos metabólicos simulados. Sin embargo, actualmente éstos afectan la integridad conductual de los norns, no la integridad corporal. Los norns no echan espuma por la boca cuando se envenenan; no tienen un “corazón” que deje de latir, o “carne” que se pudra sin oxígeno. Ciertamente, el futuro desarrollo de *Creatures* podría incluir una simulación metabólica mucho más compleja. El usuario incluso podría ser capaz de ayudar a un norn a tomar el sol para broncear su piel, o a nutrirse y ejercitarse a fin de desarrollar sus “bíceps”. No obstante, no tendrían un metabolismo real, un cuerpo real —y desde luego no tendrían una vida real—.

¿Pero qué pasaría si los “alimentos” se asociaran con energía real, la cual fuera utilizada solamente para poner en funcionamiento los procesos electrónicos subyacentes en la manifestación del norn individual en la pantalla de la computadora?

Éste sería un ejemplo del tipo de sistema ALife que discutimos antes (en relación con el segundo sentido del metabolismo), en que la prolongación de la existencia física de la criatura depende de que pueda solicitar paquetes específicos de energía real. En tal caso, puesto que son capaces de evolucionar, los norns podrían incluso desarrollar evolutivamente nuevas formas de atraer energía real y de usarla; por ejemplo, para reparar su base electrónica si ésta se dañara. No obstante, las cuestiones antes comentadas permanecerían: este caso imaginario concierne a la existencia física de la criatura, no a su cuerpo metabólicamente integrado. La construcción de la computadora y de las partes/procesos en su interior que constituyen el ser material del norn fue realizada por una construcción artificial y no por un metabolismo autónomo.

En resumen, si vemos el metabolismo (en el tercer sentido biológico) como literalmente vital, tenemos que rechazar el alegato de que los norns y sus primos cibernéticos son formas de vida simples. Hasta los norns que comen energía y se

reparan a sí mismos y que han evolucionado sin la intervención de un humano, no podrían metabolizar en este sentido fuerte.

¿PODEMOS DEJAR DE LADO EL METABOLISMO?

Alguien podría sugerir a estas alturas que para definir la vida debemos adoptar un sentido del metabolismo menos fuerte o dejar de lado totalmente el criterio del metabolismo. En tal caso, algunos de los artefactos virtuales que mencionan Langton, Ray o Grand *podrían* considerarse como entes vivientes con toda propiedad. Esto no se puede descartar como algo absurdo. No es posible definir la vida, definir el metabolismo y concluir que la vida artificial fuerte es —o no es— posible, en una forma que convenza a todo el mundo. En cambio, el concepto de la vida es negociable.

Por dos razones: primero, no existe una definición de la vida universalmente aceptada. Ni siquiera es obvio que lo que se deba hacer, en esta situación, sea *tratar* de justificar (*a priori*) una lista de condiciones suficientes y necesarias para la vida, ya que nuestro concepto usual de la vida acaso no constituya lo que los filósofos denominan una “categoría natural”. Ya señalé un ejemplo de desacuerdo definicional en la introducción, diciendo que la evolución se añade “a veces” —es decir, no siempre— a la típica lista de las propiedades vitales. De hecho, muchos biólogos ven la evolución como “el” criterio fundamental, así como algunos filósofos —por ejemplo, Mark Bedau—. ²⁰ Pero aquí surgen ciertos problemas.

Pensar que la evolución (o, en la terminología de Bedau, la “adaptación flexible”) es esencial, implica problemas filosóficos, como el mismo Bedau lo admite. Uno de ellos es que la biología creacionista se convierte en algo incoherente, no sólo en algo empíricamente falso. Otro es que las poblaciones evolutivas, más que los organismos individuales, deben tomarse como el caso paradigmático de la vida. Esto contradice el lenguaje común, porque para nosotros el león —no el linaje de los leones— está “vivo”. Tampoco se corresponde con el concepto del metabolismo: ya vimos anteriormente que incluso el sentido más débil de este término se define con referencia al mantenimiento físico de los entes individuales. (Desde esta perspectiva, la inclusión del metabolismo en la lista de los criterios vitales subraya nuestra usual suposición de que los organismos individuales son los paradigmas de la vida.) No obstante, Bedau alega que la evolución es tan im-

²⁰ M. Bedau, “The Nature of Life”, en M. A. Boden (comp.), *op. cit.*

portante en la biología teórica, que se debería considerar como la esencia misma de la vida. Otros, en cambio, alegan que la evolución —y también la reproducción— es meramente un aspecto secundario de la vida, y que uno puede imaginarse entes vivientes incapaces de experimentar ambas (véase *infra*). Además, el concepto es negociable porque incluso *si todo* el mundo hoy definiera la “vida” del mismo modo, mañana podrían tener un buen motivo para definirla de otra manera. Los descubrimientos científicos podrían llevarnos hasta una identificación (*a posteriori*) teórica de la verdadera esencia de la vida, cambiando por lo tanto la forma en que los profanos usan el término.

El planteamiento de que la evolución debe considerarse como algo esencial, por ejemplo, se remonta al inicio de la biología moderna. Antes de las investigaciones teóricas de Darwin, y acaso antes de la síntesis del darwinismo y la genética realizada en el siglo xx, hubiera sido irrazonable proponerlo, *aunque* muchos de sus predecesores creían, basándose en datos empíricos (no en una teoría explicativa), que los entes vivientes habían de alguna manera evolucionado. Nuevamente, una de las metas de ALife es la investigación de la “vida como podría serlo”, no solamente la “vida como la conocemos”.²¹ Esto podría llevarnos hasta una definición diferente, más inclusiva. De hecho, ya se ha propuesto una nueva propiedad vital “esencial”: Langton²² conjetura que todos los entes vivientes satisfacen una estrecha gama de valores numéricos del “parámetro lambda”, una sencilla medida estadística del grado de orden y novedad de un sistema. No es obvio que este tipo de descubrimiento sea imposible. En una palabra, con el avance científico la lista de las propiedades vitales puede cambiar.

Podría parecer, entonces, que la posibilidad de la vida artificial fuerte dependa meramente de un decreto definicional. Dado que hay diversos sentidos del metabolismo, ¿por qué no simplemente elegir el más débil, o el más fuerte, a fin de aceptar o de rechazar la vida artificial fuerte, respectivamente? Si hemos añadido la evolución, entonces ¿por qué no descartar el metabolismo? Podríamos conservar el fisicismo. Y seguiríamos considerando el metabolismo como una característica universal del tipo de vida (biológica) que conocemos. Pero ya no lo veríamos como algo esencial.

Ver de esta manera la situación significa confundir el decreto con la negociación. Dije antes que el concepto de la vida es negociable, no que se puede definir

²¹ C. G. Langton, “Artificial Life”, *op cit.*, p. 2; reproducido, con modificaciones, en M. A. Boden (comp.), *op. cit.*, pp. 39-94.

²² C. G. Langton, “Computation at the Edge of Chaos: Phase Transitions and Emergent Computation”, *Physica D*, 42: 12-37, 1990; C. G. Langton, “Life at the Edge of Chaos”, en C. G. Langton *et al.* (comps.), *op. cit.*

de cualquier manera. Tanto el juicio científico como el filosófico deben involucrarse en la elección de una definición, exclusivamente. Y ambos tipos de juicio implican que descartar el metabolismo en nuestro concepto de la vida no sería razonable. Es decir, la analogía que se nos pide que establezcamos aquí —entre encumbrar la evolución o descartar el metabolismo— es demasiado débil como para ser convincente.

Hay buenas razones científicas para añadir la evolución a la definición de la vida, incluso para considerarla el criterio más fundamental. Específicamente, la evolución tiene un enorme poder explicativo e integrador, ya que interconecta todos (o casi todos) los fenómenos biológicos. Aun en la biología molecular y la genética, las explicaciones evolutivas proporcionan muchos profundos conocimientos e intuiciones. Y la mayoría de los biólogos que se oponen a los planteamientos reduccionistas de la biología molecular, entendiendo la forma de los órganos y organismos como su *explanandum*, ven la evolución como algo que no es meramente universal, sino fundamental.

Pero algunos biólogos no están de acuerdo. Por ejemplo, Brian Goodwin²³ y Stuart Kauffman²⁴ alegan que la autoorganización biológica es un concepto explicativo más fundamental que la evolución —y que los dos procesos a veces se apartan—. ²⁵ Pero incluso estos teóricos rebeldes admiten que la evolución darwiniana selecciona, y por lo tanto forma (superficialmente) la gama de entes vivientes que sobreviven, dadas las potencialidades (más profundas y extensas) de la autoorganización. En una palabra, los biólogos serios —no incluyo a los creacionistas— admiten que la evolución posee una gran fuerza explicativa. Es por esta razón que Bedau está dispuesto a aceptar las implicaciones obviamente contra-intuitivas de considerar que la evolución es necesaria.

Esto no significa que todo el mundo piense que las fuertes razones para añadir la evolución a la definición de la vida sean lo suficientemente fuertes. En particular, aquellos que hacen hincapié en el criterio del metabolismo probablemente insistirían en que debemos seguir entendiendo las criaturas individuales, no las especies que han evolucionado, como el paradigma de la vida.

²³ B. C. Goodwin, "Structuralism in Biology", *Science Progress*, 74: 227-244, 1990; G. Webster y B. C. Goodwin, *Form and Transformation: Generative and Relational Principles in Biology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.

²⁴ S. A. Kauffman, *The Origins of Order: Self-organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, Oxford, 1992.

²⁵ Véase también M. Wheeler, "Cognition's Coming Home: The Reunion of Life and Mind", en P. Husbands e I. Harvey (comps.), *4th European Conference on Artificial Life*, MIT Press, Cambridge, 1997, pp. 10-19.

Veamos, por ejemplo, el argumento de los biólogos Humberto Maturana y Francisco Varela.²⁶ Su definición de la vida como la “autopoiesis en el espacio físico” es equivalente en términos generales al tercer sentido del metabolismo previamente definido por mí (en términos generales, pero no exactamente).²⁷ Ellos dicen que el concepto de la evolución *lógicamente supone* la existencia de algún tipo de unidad identificable, es decir, de un ente viviente autogenerado y automantenido por la autopoiesis. Por lo tanto, la evolución no puede ser un criterio definitorio de la vida.

Su rechazo a considerar la evolución como algo esencial no es meramente una cuestión semántica que se deriva trivialmente de la definición de la vida que ellos prefieren. Es más bien una hipótesis biológica. Ellos señalan que es concebible que una célula viviente, autoorganizada, no sea capaz de reproducirse. Aunque pudiera dividirse (ya sea accidentalmente o autónomamente) en dos mitades autopoieticas, podría no darse el autocopiado. El autocopiado implica algún tipo de relación de herencia particular entre el sistema madre y el sistema hija. Además, sin esta herencia (digital) no puede darse la evolución.²⁸ De manera que los primeros entes vivientes acaso no tuvieron la capacidad de la evolución.

Mi propio punto de vista es que ver la evolución como un criterio esencial de la vida no es correcto. Por las razones que esboqué antes, sería mejor verla como una característica universal, aunque sin duda una que posee un poder explicativo enorme. A este poder explicativo se debe que no sea sorprendente que muchos biólogos entienden la evolución como la propiedad definitoria. Pero esta definición, si se interpreta estrictamente, genera demasiadas implicaciones contraintuitivas —y biológicamente paradójicas—. Es decir, a mí no me convencen los argumentos de Bedau. Aun así, uno debe admitir que sus propuestas, y las de otros que piensan como él, son muy respetables.

No se puede decir lo mismo de alguien que pretenda descartar el metabolismo como criterio definitorio de la vida. No hay argumentos persuasivos que nos induzcan a rechazar nuestras intuiciones sobre su necesidad. Acabamos de ver que el metabolismo es incluso más fundamental que la evolución, ya que son concebibles los organismos incapaces de reproducirse, y es posible que alguna vez existieran. Y la segunda parte de este capítulo expuso que el metabolismo, en el tercer sentido, es esencial para las criaturas corpóreas autoorganizadas que

²⁶ H. Maturana y F. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, Reidel, Londres, 1980, pp. 105-107.

²⁷ Véase M. A. Boden, “Autopoiesis and Life”, *Cognitive Science Quarterly*, 1: 115-143, 2000.

²⁸ J. Maynard Smith, “Evolution: Natural and Artificial”, en M. A. Boden (comp.), *op. cit.*, p. 117.

consumen la energía de su medio ambiente. O más bien, es esencial cuando la energía no esté siempre disponible, y es útil cuando la energía no siempre se requiera inmediatamente. En cuanto al poder explicativo, el metabolismo lo tiene. Los bioquímicos han identificado diversas reacciones moleculares específicas que involucran tipos generales de relaciones metabólicas (tales como la disgregación y la catálisis) y que satisfacen los principios generales del almacenamiento y la administración de la energía (las “leyes de la bioenergética” que mencionamos al discutir los conceptos del metabolismo).

En una palabra, los avances científicos en la biología y la bioquímica refuerzan la idea común de que el metabolismo es crucial, y al mismo tiempo enriquecen el concepto considerablemente.

Serían necesarios argumentos poderosos para impugnar esta combinación de teoría científica e idea común. Pero no los hay. La única razón para proponer que descartemos el metabolismo de nuestro concepto de la vida consiste en admitir una explicación estrictamente funcionalista-informacional de la vida en general, y de la vida artificial en particular. Lo mismo se puede aplicar en relación con las sugerencias de que debilitemos la noción del metabolismo, abandonando la tercera interpretación y sustituyéndola con la mera dependencia en la energía (con o sin paquetes de energía individuales). El único propósito de esta recomendación consiste en permitir que los seres virtuales que tienen existencia física pero no cuerpo sean considerados como formas de vida. Estas muy cuestionables propuestas no tienen un fundamento que las apuntele.

Resulta muy significativo, incluso difícil, imaginar cómo podría ser este fundamento. Acaso una ciencia futura pueda descubrir extrañas, tenues nubes que se extiendan a lo largo de un gran espacio pero que de alguna manera sean identificables como (uno o más) individuos unitarios y que posean propiedades causales análogas a las de los entes vivientes —pero ¿que carezcan de metabolismo?—. En tal caso, tendríamos que aceptar que estábamos equivocados. Al fin y al cabo, el concepto de la vida es negociable.

Sin embargo, esta futura posibilidad es ininteligible. ¿Cuáles podrían ser esas “propiedades causales análogas a las de los entes vivientes” que no requirieran una unidad corporal? ¿Y cómo, sin poseer el metabolismo, podrían las nubes satisfacer cualquier principio autoorganizador de una unidad viviente? El hecho de que los escritores de ciencia ficción (incluido el cosmólogo Fred Hoyle) a veces nos han pedido que consideremos la posibilidad de tales cosas, no es una prueba de que sean razonables.

Algo similar se puede decir sobre la idea especulativa de una “computadora

cósmica” (o “computadoras”) que se extienda a través del universo, supuestamente sustentando los procesos informativos que “evolucionan y se adaptan” de manera muy parecida a como lo hacen las criaturas virtuales de Ray. Muchos son los filósofos que alegan que la vida es un fundamento necesario de la cognición. Si es así, entonces nada que no esté vivo puede considerarse como inteligente. Y si la vida requiere un tipo de unidad corpórea metabolizadora, entonces la “computadora cósmica” resulta irremediablemente dudosa.

El argumento de este capítulo sugiere que tales suposiciones de la ciencia ficción no solamente son poco posibles, sino irremediablemente incoherentes. No tenemos por qué descartar el metabolismo en el concepto de la vida sin tener un fundamento real para hacerlo. Y tampoco tenemos que debilitar nuestra (tercera) interpretación del metabolismo. Bien al contrario, debemos entenderla y aceptarla como un requisito fundamental del tipo de la autoorganización bien afinada que es característica —de hecho, necesaria— para la vida.

En resumen, el metabolismo es necesario y por lo tanto la vida artificial fuerte es imposible. Los organismos alienígenas, sean cuales fueren sus hábitats, no existen en el espacio cibernético.

BIBLIOGRAFÍA

- Beaudoin, L. P., *Goal-Processing in Autonomous Agents*, tesis de doctorado, School of Computer Science-University of Birmingham, Birmingham, 1994.
- Bedau, M., “The Nature of Life”, en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Oxford, 1996, pp. 332-358.
- Beer, R. D., *Intelligence as Adaptive Behavior: An Experiment in Computational Neuroethology*, Academic Press, Nueva York, 1990.
- Boden, M. A., “Autopoiesis and Life”, *Cognitive Science Quarterly*, 1: 115-143, 2000.
- , “Life and Cognition”, en J. Branquinho (comp.), *The Foundations of Cognitive Science at the End of the Century*, Oxford University Press, Oxford, 2000, pp. 11-22.
- Brooks, R. A., “Intelligence without Representation”, *Artificial Intelligence*, 47: 139-159, 1991.
- Burks, A. W., *Essays on Cellular Automata*, University of Illinois Press, Urbana, 1970.
- , *Theory of Self-reproducing Automata*, University of Illinois Press, Urbana, 1966.
- Cliff, D., I. Harvey y P. Husbands, “Explorations in Evolutionary Robotics”, *Adaptive Behavior*, 2 (1): 73-110, 1993.
- Doran, J. E., “Experiments with a Pleasure-Seeking Automaton”, en D. Michie (comp.), *Machine Intelligence III*, Edinburgh University Press, Edimburgo, 1968, pp. 195-216.

- Drexler, K. E., "Biological and Nanomechanical Systems: Contrasts in Evolutionary Complexity", en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, Redwood City, 1989, pp. 501-519.
- Goodwin, B. C., "Structuralism in Biology", *Science Progress*, 74: 227-244, 1990.
- Grant, S., D. Cliff y A. Malhotra, *Creatures: Artificial Life Autonomous Software Agents for Home Entertainment*, Research Report CSRP 434, Brighton University of Sussex-School of Cognitive and Computing Sciences, 1996. Disponible en: <ftp://ftp.Cogs.susx.ac.Uk/pub/reports/csrp/csrp434.ps.Z>.
- Kauffman, S. A., *The Origins of Order: Self-organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, Oxford, 1992.
- Langton, C. G., "Artificial Life", en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, Redwood City, 1989, p. 2.
- , "Computation at the Edge of Chaos: Phase Transitions and Emergent Computation", *Physica D*, 42: 12-37, 1990.
- , "Life at the Edge of Chaos", en C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992.
- , "Studying Artificial Life with Cellular Automata", *Physica D: Nonlinear Phenomena*, 22 (1-3): 120-149, 1986.
- Levy, S., *Artificial Life: The Quest for a New Creation*, Pantheon, Nueva York, 1992.
- Maturana, H., y F. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, Reidel, Londres, 1980. [Versión en español: *De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: la organización de lo vivo*, Editorial Universitaria, Santiago de Chile, 2006.]
- Moran, F., A. Moreno, F. Montero y E. Minch, "Further Steps towards a Realistic Description of the Essence of Life", en C. G. Langton y T. Shimohara (comps.), *Artificial Life V*, MIT Press, Cambridge, 1997.
- Moreno, A., y K. Ruiz-Mirazo, "Metabolism and the Problem of its Universalization", *Biosystems*, 49: 45-61, 1999.
- Ray, T. S., "An Approach to the Synthesis of Life", en C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 371-408.
- , "An Evolutionary Approach to Synthetic Biology: Zen and the Art of Creating Life", *Artificial Life*, 1: 179-210.
- Searle, J. R., "Minds, Brains, Programs", *Behavioral Brain Science*, 3: 427-457, 1980.
- Slovan, A., "Motives, Mechanisms, Emotions", en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Intelligence*, Oxford University Press, Oxford, 1990, pp. 231-247. [Versión en español: "Los motivos, los mecanismo y las emociones", en M. A. Boden (comp.), *Filosofía de la inteligencia artificial*, Fondo de Cultura Económica, México, 1994, pp. 259-277.

- Smith, J. Maynard, "Evolution: Natural and Artificial", en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Oxford, 1996, pp. 173-178.
- Walter, W. Grey, "An Imitation of Life", *Scientific American*, 182: 42-45, 1950.
- Webster, G., y B. C. Goodwin, *Form and Transformation: Generative and Relational Principles in Biology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- Wheeler, M., "Cognition's Coming Home: The Reunion of Life and Mind", en P. Husbands e I. Harvey (comps.), *4th European Conference on Artificial Life*, MIT Press, Cambridge, 1997, pp. 10-19.
- Wright, I. P., *Emotional Agents*, tesis de doctorado, School of Computer Science-University of Birmingham, Birmingham, 1997.
- Wright, I. P., A. Sloman y L. Beaudoin, "Towards a Design-based Analysis of Emotional Episodes", *Philosophy, Psychiatry and Psychology*, 3 (2): 101-137, 1996.
- Zeleny, M., "Self-organization of Living Systems: A Formal Model of Autopoiesis", *International Journal of General Systems*, 4: 27, 1977.

Hod Lipson y Jordan P. Pollack

XIX. DISEÑO Y MANUFACTURA AUTOMÁTICOS DE FORMAS DE VIDA ROBÓTICAS*

EN EL campo de la vida artificial, “la vida como podría ser” se investiga sobre la base de la comprensión de los principios y la simulación de los mecanismos de las formas de vida biológicas reales.¹ Así como los aeroplanos utilizan los mismos principios que las aves, pero tienen alas fijas, las formas de vida artificiales podrían tener en común con las formas de vida biológicas los mismos principios, pero no la misma implementación química. La energía almacenada, el movimiento autónomo e incluso la comunicación animal se replican en los juguetes que utilizan baterías, motores y chips computacionales.

Nuestro planteamiento medular consiste en que para crear la vida artificial hay que lograr la autonomía total, no sólo en el nivel de la fuente de poder y la conducta (la meta de la robótica, hoy),² sino también en los niveles del diseño y la fabricación. Sólo entonces podemos esperar que las criaturas sintéticas puedan sustentar su propia evolución. Por lo tanto buscamos crear artefactos físicos cuya arquitectura sea variada (todos posiblemente diferentes), que sean funcionales en el mundo real y que sea posible producir automáticamente en poco tiempo y en grandes cantidades. Hasta ahora no se ha cumplido con estos requisitos.

Los experimentos que aquí se describen utilizan la computación evolutiva para el diseño y la fabricación aditiva para la reproducción. El proceso evolutivo opera en una población de robots prototípicos, cada uno de los cuales se compone de cierto repertorio de elementos constitutivos. Este proceso evolutivo, utilizando una serie de operadores, reiteradamente selecciona las máquinas más aptas, crea vástagos mediante la agregación, la modificación y la eliminación de sus componentes, e inserta los vástagos en la población remplazando a otros (véase el apartado de métodos). La computación evolutiva se ha aplicado en muchos pro-

* Este capítulo apareció originalmente en *Nature*, 406: 974-978, 2000.

¹ J. M. Smith, “Byte-Sized Evolution”, *Nature*, 355: 772-773, 1992.

² M. Swinson, “Mobile Autonomous Robot Software”, Report BAA-99-09, Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), Arlington, 1998.

blemas de ingeniería.³ Sin embargo, las investigaciones en el campo de la robótica evolutiva hasta la fecha se han relacionado con mundos totalmente virtuales,⁴ o, en el mundo real, solamente con el control de los robots diseñados y construidos manualmente.⁵ Estos robots tienen una arquitectura predominantemente fija, aunque Lund⁶ ha desarrollado evolutivamente aspectos parciales de su morfología. A su vez, Thompson ha desarrollado evolutivamente circuitos eléctricos físicos para el control, y nosotros hemos desarrollado evolutivamente estructuras estáticas de tipo Lego, aunque tuvimos que construir manualmente los diseños producidos.⁷ Otras investigaciones que involucran robots reales utilizan componentes de alto nivel tecnológico que incorporan instrucciones preprogramadas.⁸ Además, la tecnología de la fabricación aditiva se ha estado desarrollando con base en los materiales y en la fiabilidad mecánica,⁹ pero no se ha puesto bajo el control de un proceso evolutivo.

Nuestro proyecto se basa en la utilización de componentes y operadores elementales, tanto en el proceso de diseño como en el proceso de la fabricación. Ya que los componentes son más elementales que los operadores, cualquier tendencia inductiva en relación con ellos se minimiza, y al mismo tiempo se maximiza la flexibilidad arquitectónica. Además, la utilización de componentes elementales en el proceso de la fabricación permite que sean más sistemáticos y versátiles. En el extremo teórico, si sólo pudiéramos utilizar átomos como componentes, leyes de la física como restricciones y nanomanipulación en la fabricación, se maximizaría la versatilidad del espacio de diseño manufacturable. Existen trabajos anteriores que utilizaron componentes de nivel superior y arquitecturas limitadas

³ P. Bentley (comp.), *Evolutionary Design by Computers*, Morgan Kaufmann, San Francisco, 1999.

⁴ K. Sims, "Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition", en R. Brooks y P. Maes (comps.), *Artificial Life IV*, MIT Press, Cambridge, 1994; M. Komosinski y S. Ulatowski, "Framsticks: Toward a Simulation of Nature-like World, Creatures and Evolution", en D. Floreano, J.-D. Nicoud y F. Mondada (comps.), *Advances in Artificial Life*, Springer, Berlín, 1999, pp. 262-265.

⁵ D. Floreano y F. Mondada, "Automatic Creation of an Autonomous Agent: Genetic Evolution of a Neural-Network Driven Robot", en D. Cliff *et al.* (comps.), *From Animals to Animats III*, MIT Press, Cambridge, 1994, pp. 421-430; P. Husbands y J.-A. Meyer, *Evolutionary Robotics*, Springer, Berlín, 1998; S. Nolfi, "Evolving Non-Trivial Behaviors on Real-Robots: A Garbage Collecting Robot", *Robotics and Autonomous Systems*, 22: 187-198, 1992.

⁶ H. Lund, J. Hallam y W. Lee, "A Hybrid GP/GA Approach for Co-Evolving Controllers and Robot Bodies to Achieve Fitness-Specified Tasks", *Proceedings of IEEE. 3rd International Conference on Evolutionary Computation*, IEEE Press, Piscataway, 1996, pp. 384-389.

⁷ P. Funes y J. Pollack, "Evolutionary Body Building: Adaptive Physical Designs for Robots", *Artificial Life*, 4: 337-357, 1998.

⁸ C. Leger, *Automated Synthesis and Optimization of Robot Configurations: An Evolutionary Approach*, tesis de doctorado, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, 1999.

⁹ A. Kochan, "Rapid Prototyping Trends", *Rapid Prototyping Journal*, 3: 150-152, 1997.

(por ejemplo, únicamente las estructuras de árbol)¹⁰ y que produjeron rápidamente soluciones aceptables, pero a expensas de truncar el espacio de diseño. Además, estos espacios de diseño no tomaban en cuenta la manufacturabilidad.

El espacio de diseño que nosotros utilizamos consistió en barras y actuadores como componentes de la estructura, y neuronas artificiales como componentes del control. Las barras conectadas a articulaciones libres pueden formar potencialmente entramados —estructuras ya sea rígidas, flexibles o articuladas— así como múltiples estructuras individuales, y pueden emular articulaciones planares, lineales y giratorias en varios niveles jerárquicos. Similarmente, las neuronas artificiales pueden conectarse para crear arquitecturas de control arbitrario, tales como las redes recurrentes y de proalimentación, las máquinas de estado, y múltiples controladores independientes (como los ganglios múltiples). La fabricación aditiva, en que la estructura se genera capa por capa, permite la generación automática de estructuras físicas arbitrariamente complejas y la rápida construcción de cuerpos físicamente diferentes, incluido cualquiera que esté compuesto de nuestros componentes. La figura XIX.1 muestra una ilustración esquemática de una posible arquitectura. Las barras se conectan entre sí mediante rótulas, las neuronas se pueden conectar con otras neuronas mediante conexiones sinápticas, y las neuronas se pueden conectar con las barras. En este último caso, la longitud de las barras se gobierna por el *output* de la neurona mediante un actuador lineal. No se utilizaron sensores.

Comenzando con una población de 200 máquinas inicialmente compuestas de cero barras y cero neuronas, llevamos a cabo una evolución simulada. La adecuación de una máquina se determinó por su habilidad de locomoción: la distancia neta que su centro de masa cubría en un plano infinito en un tiempo fijo. El proceso seleccionaba iterativamente las máquinas más aptas, creando vástagos mediante la agregación, modificación y eliminación de los componentes, y las introducía sustitutivamente en la población (véase el apartado de métodos). Este proceso típicamente continuaba a lo largo de 300 a 600 generaciones. De esta manera se hizo coevolucionar simultáneamente tanto el cuerpo (la morfología) como el cerebro (el control).

El simulador que utilizamos para evaluar la adecuación (véase el apartado de métodos) sustentaba el movimiento casi estático en el cual cada marco se encuentra estáticamente estable. Este tipo de movimiento es más fácil de transferir fiablemente a la realidad y, sin embargo, es suficiente para sustentar la locomoción

¹⁰ K. Sims, *op. cit.*; M. Komosinski y S. Ulatowski, *op. cit.*

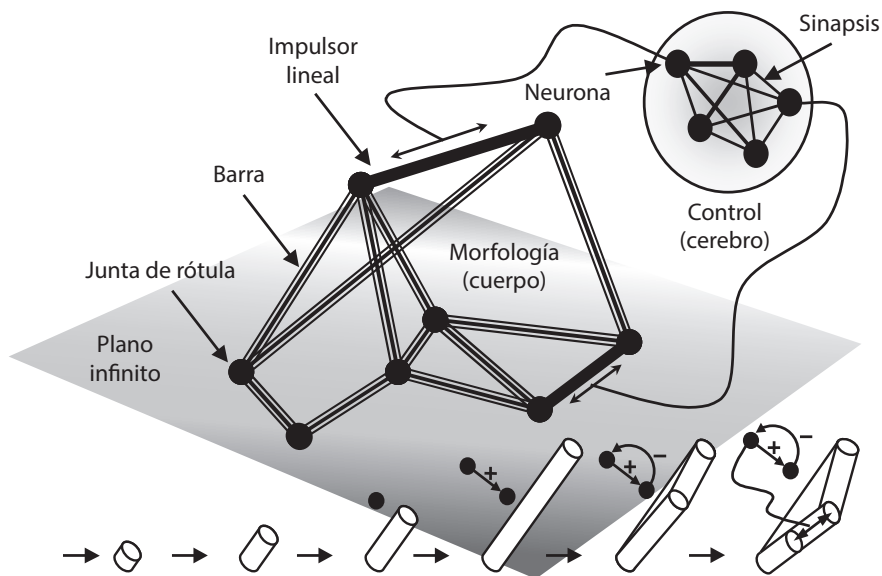


FIGURA XIX.1. Ilustración esquemática de un robot evolutivo.

Las barras se conectan entre sí para formar entramados arbitrarios; cambiando el número de barras y la forma en que se conectan se modifica el comportamiento estructural del entramado; algunas subestructuras pueden quedar rígidas, otras pueden quedar articuladas. Las neuronas se conectan entre sí mediante sinapsis para formar redes neurales recurrentes arbitrarias. Cambiando el peso de las sinapsis y el umbral de activación de la neurona se modifica el comportamiento de la neurona. Además, nosotros les permitimos a las neuronas conectarse a las barras: de la misma manera que una neurona real gobierna la contracción del tejido muscular, la señal de la neurona artificial controla la longitud de la barra mediante un impulsor lineal. Todos estos cambios se pueden producir por operadores mutacionales. Una secuencia de operadores puede construir un robot y su controlador desde cero mediante la agregación, modificación y eliminación de los componentes. La secuencia al pie de la imagen muestra una progresión arbitraria de operadores que crean una pequeña barra, la alargan y la dividen. Simultáneamente, otros operadores crean una neurona, luego otra neurona, las conectan en un bucle y finalmente conectan una de las neuronas a una de las barras. La barra es ahora un impulsor. Puesto que no se utilizaron sensores, estos robots sólo pueden generar patrones y acciones, pero no pueden adaptarse directamente a su medio ambiente.

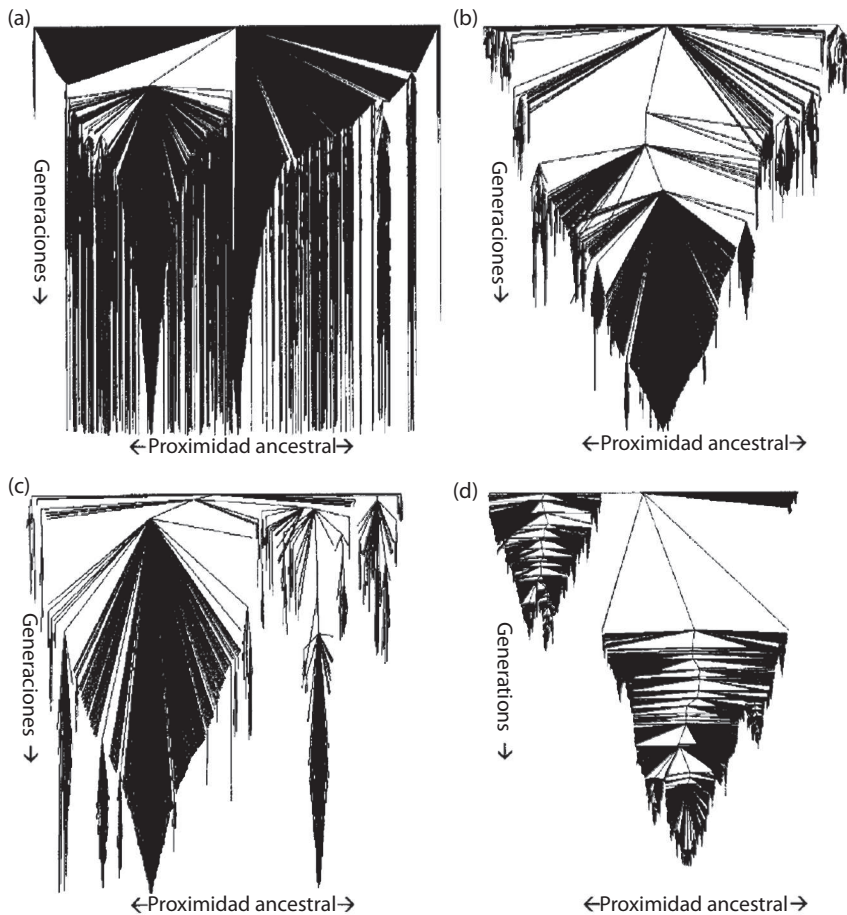


FIGURA XIX.2. Árboles filogenéticos de diversos programas evolutivos.

Cada nodo en el árbol representa un individuo y los vínculos representan las relaciones progenitor-vástago. El eje vertical representa las generaciones y el eje horizontal representa la proximidad ancestral en términos de saltos necesarios a lo largo del árbol para pasar de un individuo a otro. Todos los árboles se originan en una raíz común que denota un robot vacío con cero barras y cero impulsores. Los árboles muestran varios grados de divergencia y especiación: a) la divergencia extrema producida por los métodos de nichos (S. W. Mahfoud, “Nicheing Methods for Genetic Algorithms”, tesis de doctorado, University of Illinois, Urbana-Champaign, 1999); b) la convergencia extrema producida por la selección de la adecuación proporcionada; c) la divergencia del nivel intermedio típica en las etapas tempranas de la selección de la adecuación proporcionada, y d) la extinción masiva producida por la selección de la adecuación proporcionada. Los árboles están adelgazados y cada uno representa varios cientos de generaciones.

de baja intensidad. Típicamente, varias decenas de generaciones transcurrieron antes de que ocurriera el primer movimiento. Por ejemplo, en el nivel mínimo, una red neural que genere un *output* variable debe ensamblarse y conectarse a un impulsor para que se produzca cualquier tipo de movimiento (véase la secuencia en la figura XIX.1 para un ejemplo de esto). Varios patrones de dinámicas evolutivas emergieron, algunos de los cuales son parecidos a los árboles filogenéticos naturales. La figura XIX.2 presenta ejemplos de casos extremos de convergencia, especiación y extinción masiva. Un ejemplo de una generación que se redujo a individuos únicos se muestra en la figura XIX.3.

Los robots virtuales seleccionados entre los que tuvieron desempeños óptimos fueron entonces automáticamente convertidos en objetos físicos: los cuerpos, representados solamente con puntos y líneas, fueron convertidos en modelos sólidos con articulaciones rotulares y motores lineales de acuerdo con los diseños evolucionados (figura XIX.4). Esta etapa de “solidificación” se realizó mediante un programa automático que combinaba los componentes prediseñados, describiendo una barra genérica, una junta rotular y un impulsor. Los cuerpos sólidos virtuales entonces se “materializaron” usando tecnología prototípica comercial rápida (figura XIX.4b). Esta máquina utilizaba una cabeza térmicamente controlada para expulsar el material termoplástico capa por capa, de manera que la morfología arbitrariamente evolucionada emergía como una estructura sólida tridimensional sin la utilización de herramientas o sin la intervención humana. Toda la máquina preensamblada se fabricó como una sola unidad, con finos soportes de plástico que se conectaban entre partes movibles (figura XIX.4c); estos soportes se rompieron con los primeros movimientos. Las estructuras resultantes contenían complejas articulaciones que sería difícil diseñar o manufacturar usando métodos tradicionales (figuras XIX.4d y XIX.5). Seguidamente se colocaron motores paso a paso, y la red neural evolucionada se ejecutó en un microcontrolador para activar los motores. Las máquinas físicas (tres, hasta la fecha) entonces reprodujeron fielmente en la realidad el comportamiento virtual de sus ancestros (véase el cuadro XIX.1).

A pesar de la relativamente sencilla tarea y el relativamente sencillo medio ambiente (el movimiento a lo largo de un plano horizontal) evolucionaron soluciones sorprendentemente diferentes y complejas. Las máquinas típicamente contenían casi 20 componentes, a veces significativamente redundantes (acaso para que una mutación fuera menos catastrófica).¹¹ No menos sorprendente fue

¹¹ R. E. Lenski *et al.*, “Genome Complexity, Robustness and Genetic Interactions in Digital Organisms”, *Nature*, 400: 661-664, 1999.

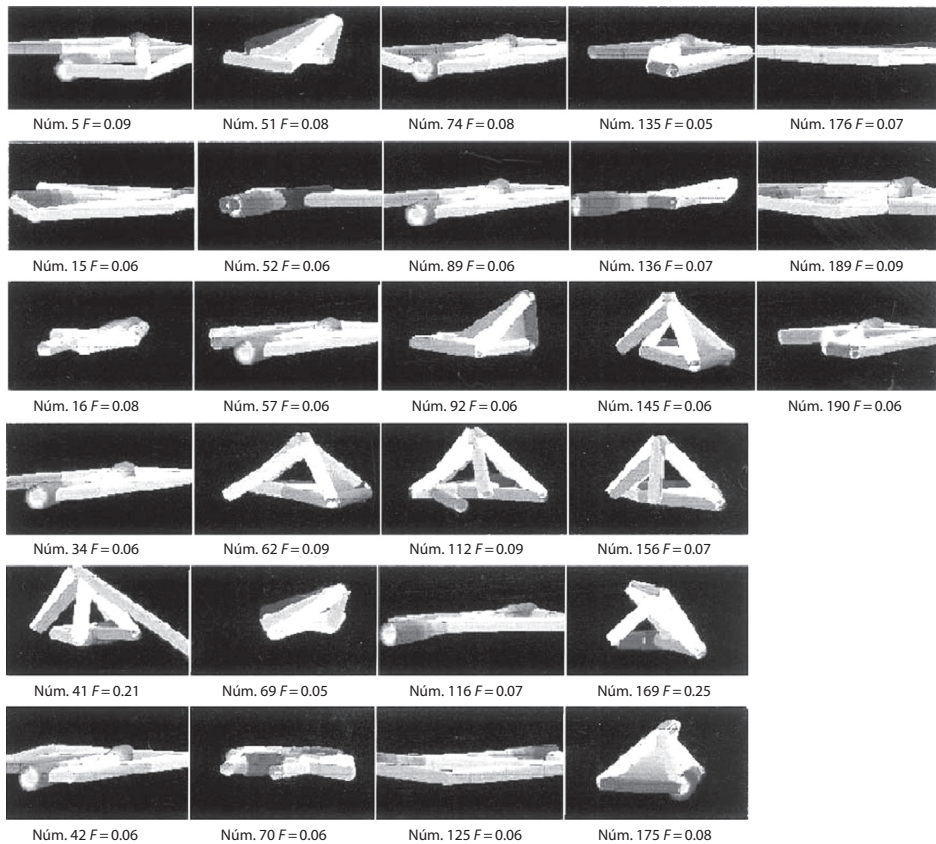


FIGURA XIX.3. Una generación de robots.

Muestra arbitraria de toda una generación, reducida para mostrar únicamente los individuos significativamente diferentes. La anotación debajo de las imágenes proporciona una cifra arbitraria de clasificación (utilizada como referencia) y denota la adecuación del individuo. Se pueden observar dos subpoblaciones de robots, las dos con sus propias variaciones: una que yace extendida en el suelo y la otra con una estructura más elevada.

el hecho de que algunas (por ejemplo, las máquinas de la figura XIX.5b) mostraban simetría, la cual ni se especificaba ni recompensaba en el código; una posible explicación es que las máquinas simétricas se mueven preferentemente en línea recta y por lo tanto cubren una mayor distancia neta y adquieren una mayor adecuación. De manera similar, los diseños exitosos parecieron ser más robustos, en el sentido de que las modificaciones de las longitudes de las barras no estorbaron significativamente su movilidad. En la figura XIX.5 se muestran y describen en for-

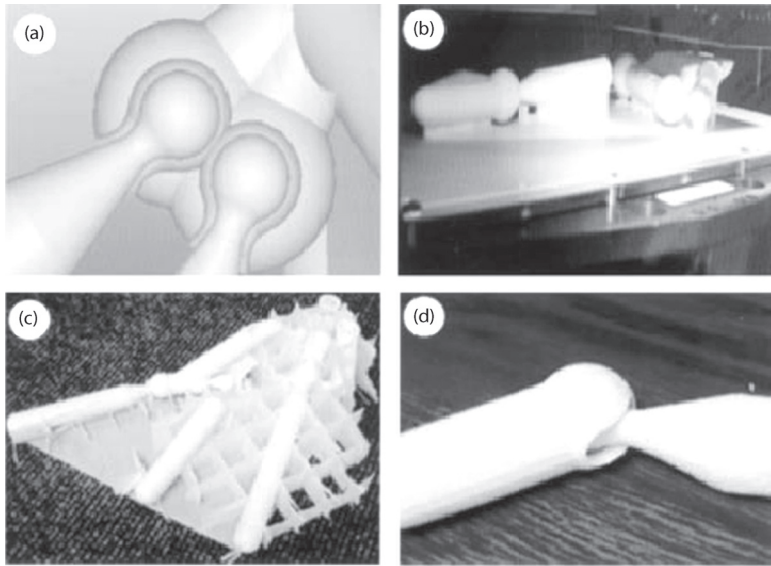


FIGURA XIX.4. *Proceso de materialización física.*

(a) Articulaciones “encarnadas” automáticamente en un espacio virtual; (b) proceso de una réplica física en una máquina prototípica rápida que construye una capa morfológica tridimensional capa tras capa; (c) cuerpo preensamblado en medio molde con una estructura de soporte removible; (d) imagen de acercamiento del molde de una articulación como una sola unidad. La junta rotular está sellada dentro de la articulación.

ma detallada tres máquinas que explotan los principios del trinquete (figura XIX.5a), de la sincronización antifase (figura XIX.5b) y del arrastre (figura XIX.5c). Otras (que no mostramos) usaban una especie de bipedalismo de arrastre: un cuerpo que yace en el piso avanza mediante el empuje alternado de un “miembro” derecho y un “miembro” izquierdo. Algunas realizan movimientos laterales del tipo de los cangrejos. Otras utilizaban un mecanismo equilibrador para desplazar un punto de fricción de lado a lado y avanzar mediante un movimiento oscilatorio. El cuadro XIX.1 compara el desempeño de tres máquinas físicas con el de sus ancestros virtuales. Vemos que si bien la distancia total cubierta en el caso segundo y en el caso tercero no es la misma, en todos los casos el movimiento físico se logró utilizando los correspondientes principios mecánicos y de control. La diferencia en la distancia se deriva de que los miembros resbalan en la superficie, hecho que indica que el modelo de fricción utilizado en la simulación no era realista.

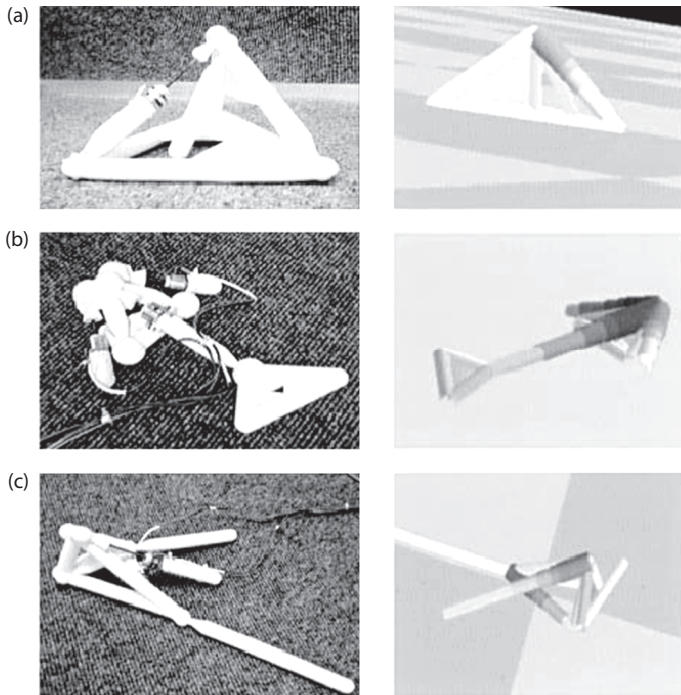


FIGURA XIX.5. Tres de los robots resultantes.

Los robots reales (lado izquierdo); los robots simulados (lado derecho). a) Un mecanismo tetraédrico que produce un movimiento de bisagra y avanza apoyando la barra central en el piso. b) Esta máquina sorprendentemente simétrica utiliza una red neuronal de siete neuronas para empujar el impulsor central en perfecta antifase con los dos sincronizados miembros impulsores laterales. Cuando los dos miembros de arriba se impulsan, el cuerpo central se retrae, y viceversa. c) Este mecanismo tiene un cuerpo elevado desde el cual apoya un impulsor directamente en el suelo a fin de crear un movimiento de trinquete. Tiene unas barras redundantes que se arrastran en el suelo, lo cual acaso contribuya a su estabilidad. Los tiempos de impresión son de 22, 12 y 18 horas, respectivamente. Estas máquinas funcionan en el mundo real de la misma manera que lo hacen en la simulación.

Aunque tanto las máquinas como los movimientos que aquí describimos son bastante sencillos en comparación con las máquinas y los movimientos producidos por los ingenieros humanos (y por la evolución biológica), hemos demostrado un proceso de “autoiniciación a partir de cero” mediante el cual ciertos sistemas electromecánicos automáticamente diseñados se han manufacturado robóticamente. Minimizamos escrupulosamente la intervención humana, tanto en el di-

CUADRO XIX.1. *Resultados*

<i>Máquina</i>	<i>Distancia cubierta (cm)</i>	
	<i>Virtual</i>	<i>Física</i>
Tetraedro (figura XIX.5a)	38.5	38.4 (35)
Flecha (figura XIX.5b)	59.6	22.5 (18)
Impulsador (figura XIX.5c)	85.1	23.4 (15)

NOTA: Comparación de la actuación de las máquinas físicas con la actuación de sus originales virtuales. Los valores equivalen a la distancia neta que el centro de masa de cada máquina cubrió durante 12 ciclos de la red neural. Las distancias que aparecen en la columna “Física” se compensan en relación con la reducción de la escala (la distancia real se muestra entre paréntesis). El desajuste en las últimas dos filas se debe primordialmente al resbalamiento de los miembros en la superficie.

seño como en las etapas de la fabricación. Aparte de insertar los motores, el único trabajo humano consistió en informar a la simulación cuál era el “universo” que podía ser manufacturado.

Aparte de su química orgánica específica, la vida es un proceso de diseño autónomo que controla una compleja serie de “fábricas” químicas y que permite generar y poner a prueba entes físicos que explotan las propiedades del medio que ellos mismos construyen. Utilizando un medio diferente, a saber, un tipo de manufactura rápida y común, y un diseño evolutivo en la simulación, hemos avanzado en la replicación de esta autonomía de diseño y manufactura. Según nosotros, ésta es la primera vez que un sistema evolutivo artificial se ha conectado a un sistema de construcción físico automático. Nuestro sistema de diseño evolutivo, de proceso de “solidificación”, y de máquina de producción rápida de prototipos, conjuntamente forma un robot replicador primitivo. Aunque faltan muchos, muchos pasos antes de que esta tecnología resulte ser peligrosa,¹² nosotros creemos que si en efecto los sistemas artificiales habrán de interactuar e integrarse con la realidad, no pueden permanecer en estado virtual; es crucial que atraviesen el abismo entre la simulación y la realidad a fin de que puedan aprender, evolucionar¹³ e influir directamente en el mundo físico.¹⁴ A la larga, el proceso evolutivo deberá aceptar la retroalimentación del desempeño viviente de sus productos.

Será necesario trabajar más para entender, sobre todo, cómo podrían autoorganizarse las estructuras modulares más complejas y cómo estas estructuras más

¹² B. Joy, “Why the Future Doesn’t Need Us”, *Wired Magazine*, 8 (4): 238-264, 2000.

¹³ R. A. Watson, S. G. Fici y J. B. Pollack, “Embodied Evolution: Embodying an Evolutionary Algorithm in a Population of Robots”, en P. Angeline (comp.), *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation*, 1999, pp. 355-342.

¹⁴ R. D. Beer, *Intelligence as Adaptive Behavior*, Academic Press, Nueva York, 1990.

complejas, bajo el control del proceso evolutivo, podrían transferirse a la realidad. Los avances tecnológicos en los sistemas mecánicos microeléctricos (MEMS), la nanofabricación y la creación rápida de prototipos que puedan insertar circuitos¹⁵ e impulsores¹⁶ en los materiales básicos, junto con una simulación física de mayor fidelidad y una comprensión mayor de los procesos computacionales evolutivos, podrían preparar el terreno para el avance autosustentado que Moravec ha denominado “velocidad de despegue”.¹⁷

MÉTODOS

Representación de los robots

Se representó un robot utilizando una serie de números enteros y de puntos flotantes que describen barras, neuronas y su conectividad como sigue:

robot: = <vértices> <barras> <neuronas> <impulsores>

vértice: = < x , y , z >

barra: = <vértice 1 índice, vértice 2 índice, longitud relajada, rigidez>

neurona: = <umbral, coeficientes sinápticos de las conexiones a todas las neuronas>

impulsor: = <índice de barra, índice de neurona, alcance de la barra>

Proceso evolutivo

Los experimentos se realizaron utilizando la versión 1 de GOLEM (Genetically Organized Lifelike Electro Mechanics) [Electromecánica Genéticamente Organizada de Tipo Viviente], que está disponible en <<http://www.demo.cs.brandeis.edu/golem>>. Nosotros elaboramos un proceso evolutivo simulado: la función de la aptitud se definió como la distancia euclidiana neta que el centro-de-masa de un individuo cubre durante un número fijo de ciclos (12) de su control neural. Empezamos con una población de 200 individuos nulos (vacíos). Cada experimento utilizaba una semilla aleatoria diferente. Los individuos fueron entonces seleccionados, mutados e introducidos (en estado estable) sustitutivamente en la población, de

¹⁵ K. Ziemelis, “Putting it on Plastic”, *Nature*, 393: 619-620, 1998.

¹⁶ R. H. Baughman *et al.*, “Carbon Nanotube Actuators”, *Science*, 284: 1340-1344, 1999.

¹⁷ H. Moravec, *Robot – From Mere Machine to Transcendent Mind*, Oxford University Press, Oxford, 1999.

la siguiente forma: las funciones de selección que utilizamos fueron aleatorias, proporcionales a la adecuación o proporcionales al rango. Los operadores de mutación para generar un descendiente se emplearon independientemente con las siguientes probabilidades: una pequeña mutación en la longitud de la barra o el peso sináptico de la neurona (0.1), la eliminación o agregación de una pequeña barra colgante o una neurona desconectada (0.01), la división de un vértice en dos y la agregación de una pequeña barra, o la división de una barra en dos y la agregación de un vértice (0.03), y la conexión o desconexión de una neurona a una barra (0.03). Las mutaciones tuvieron lugar en la representación simbiótica del fenotipo. Tras la mutación, se le asignó al individuo una nueva adecuación mediante una simulación de la mecánica y el control (véanse detalles *infra*). El descendiente se insertó en la población reemplazando a un individuo existente. Las funciones del remplazo que utilizamos eligieron a los individuos que se reemplazaron ya sea aleatoriamente, en proporción inversa a su adecuación, o empleando criterios de similitud proporcional (agrupamiento determinista).¹⁸ Varias permutaciones de los métodos de selección-remplazo son posibles; los resultados que registramos aquí se obtuvieron utilizando la selección de la adecuación proporcionada y el remplazo aleatorio. Sin embargo, se obtuvieron resultados equivalentes utilizando la selección de rango en vez de la selección de adecuación proporcionada. El proceso se continuó a lo largo de 300 a 600 generaciones (aproximadamente 10^5 evaluaciones en total). El proceso fue realizado a la vez de manera serial y de manera paralela (con una computadora de 16 procesadores). En las computadoras paralelas observamos una tendencia inherente hacia la sencillez: las máquinas más sencillas podían completar su evaluación antes y consecuentemente podían reproducirse más rápidamente que las máquinas complejas (esto podría evitarse con una implementación generacional).

Nuestra simulación evolutiva se basó en estrategias evolutivas¹⁹ y en una programación evolutiva,²⁰ ya que manipulaba directamente las representaciones valoradas continuas y sólo utilizaba operadores de mutación elementales. Alternativamente, podíamos haber utilizado los algoritmos genéticos²¹ y la programación

¹⁸ S. W. Mahfoud, *op. cit.*

¹⁹ I. Rechenberg, *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*, Frommann-Holzboog, Stuttgart, 1973.

²⁰ L. J. Fogel, L. J. Owens y M. J. Walsh, *Artificial Intelligence through Simulate Evolution*, Wiley, Nueva York, 1966.

²¹ J. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.

genética²² que introducen operadores entrecruzados sensibles a la estructura de las máquinas, lo cual podría cambiar la cadencia de la evolución y producir estructuras replicadas. No establecimos una gramática morfológica a partir de la cual el cuerpo se pudiera desarrollar,²³ sino que hicimos que evolucionara directamente la representación simbólica del fenotipo. Y, en vez de separar el cuerpo (la morfología) y el cerebro (el control) en poblaciones distintas, o de insertar una etapa “neonatal” que pudiera permitirnos seleccionar los cerebros que son capaces de aprender a controlar su cuerpo, simplemente aplicamos la selección a los cuerpos y a los cerebros, en cuanto unidades integradas. Este planeamiento experimental simplificado se basaba en nuestro enfoque en completar el enlace de la simulación y la realidad, pero prevemos que las muchas técnicas que se han desarrollado en el aprendizaje evolutivo y coevolutivo²⁴ habrán de enriquecer nuestros resultados.

Simulación

Tanto la mecánica como el control neural de una máquina se simularon simultáneamente. La mecánica se simuló usando el movimiento casi estático, donde se supuso que cada cuadro del movimiento era estáticamente estable. Este tipo de movimiento se simula y se induce en la realidad fácilmente, pero es lo suficientemente complejo como para sustentar varios tipos de movimientos de baja intensidad, tales como arrastrarse o caminar (pero no saltar). El modelo consistía en barras cilíndricas con diámetros verdaderos que se articulaban con juntas de rótula. Todos los cuadros se solucionaban mediante la relajación: se definía un término energético, tomando en cuenta la elasticidad de las barras, la energía gravitacional potencial y la energía de penetración de la colisión y el contacto. Los grados de libertad del modelo (coordenadas de los vértices) entonces se ajustaban iterativamente de acuerdo con sus derivaciones a fin de minimizar el término energético, y la energía se recalculaba. También se modeló la fricción estática. La utilización de la relajación permitió el manejo de las singularidades (por ejemplo,

²² J. Koza, *Genetic Programming*, MIT Press, Cambridge, 1992.

²³ F. Gruau y K. Quatramaras, “Cellular Encoding for Interactive Evolutionary Robotics”, en P. Husbands e I. Harvey (comps.), *Fourth European Conference on Artificial Life*, MIT Press, Cambridge, 1997.

²⁴ K. Chellapilla y D. Fogel, “Evolution, Neural Networks, Games and Intelligence”, en *Proceedings of 1987 IEEE Conference on Computer Design, VLSI in Computers and Processors*, IEEE Computer Society Press, Washington, 1999, pp. 1471-1496; W. D. Hillis, “Co-Evolving Parasites Improves Simulated Evolution as an Optimizing Procedure”, en C. G. Langton *et al.* (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 313-322; J. B. Pollack y A. D. Blair, “Co-Evolution in the Successful Learning of Backgammon Strategy”, *Machine Learning*, 32: 225-240, 1998.

el rompimiento debido a la torcedura) y los casos de elementos sujetos a menores fuerzas (como una barra colgante). Se agregó ruido computacional para asegurar que el sistema no convergiera en puntos de equilibrio inestables, y para cubrir la separación simulación-realidad. Las propiedades materiales que se modelaron correspondían a las propiedades del material de creación rápida de prototipos (módulo de elasticidad, $E = 0.896$ GPa; densidad específica, $\rho = 1\,000$ kg m⁻³; límite de deformación, $\sigma_{\text{deformación}} = 19$ MPa). La red neural se disimuló en ciclos sincronizados distintos. En cada ciclo, las longitudes de los impulsores se modificaron mediante pequeños incrementos no mayores de un centímetro.

BIBLIOGRAFÍA

- Baughman, R. H., *et al.*, "Carbon Nanotube Actuators", *Science*, 284: 1340-1344, 1999.
- Beer, R. D., *Intelligence as Adaptive Behavior*, Academic Press, Nueva York, 1990.
- Bentley, P. (comp.), *Evolutionary Design by Computers*, Morgan Kaufmann, San Francisco, 1999.
- Chellapilla, K., y D. Fogel, "Evolution, Neural Networks, Games and Intelligence", en *Proceedings of 1987 IEEE Conference on Computer Design, VLSI in Computers and Processors*, IEEE-Computer Society Press, Washington, 1999, pp. 1471-1496.
- Floreano, D., y F. Mondada, "Automatic Creation of an Autonomous Agent: Genetic Evolution of a Neural-Network Driven Robot", en D. Cliff *et al.* (comps.), *From Animals to Animats III*, MIT Press, Cambridge, 1994, pp. 421-430.
- Fogel, L. J., L. J. Owens y M. J. Walsh, *Artificial Intelligence through Simulate Evolution*, Wiley, Nueva York, 1966.
- Funes, P., y J. Pollack, "Evolutionary Body Building: Adaptive Physical Designs for Robots", *Artificial Life*, 4: 337-357, 1998.
- Gruau, F., y K. Quatramaras, "Cellular Encoding for Interactive Evolutionary Robotics", en P. Husbands e I. Harvey (comps.), *Fourth European Conference on Artificial Life*, MIT Press, Cambridge, 1997.
- Hillis, W. D., "Co-Evolving Parasites Improves Simulated Evolution as an Optimizing Procedure", en C. G. Langton *et al.* (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 313-322.
- Holland, J., *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- Husbands, P., y J.-A. Meyer, *Evolutionary Robotics*, Springer, Berlín, 1998.

- Joy, B., "Why the Future Doesn't Need Us", *Wired*, 8 (4): 238-264, 2000.
- Kochan, A., "Rapid Prototyping Trends", *Rapid Prototyping Journal*, 3: 150-152, 1997.
- Komosinski, M., y S. Ulatowski, "Framsticks: Toward a Simulation of Nature-like World, Creatures and Evolution", en D. Floreano, J. D. Nicoud y F. Mondada (comps.), *Advances in Artificial Life. Proceedings of the 5th European Conference, ECAL*, Springer, Berlín, 1999, pp. 262-265.
- Koza, J., *Genetic Programming*, MIT Press, Cambridge, 1992.
- Leger, C., *Automated Synthesis and Optimization of Robot Configurations: An Evolutionary Approach*, tesis de doctorado, Carnegie Mellon University, Pittsburg, 1999.
- Lenski, R. E., et al., "Genome Complexity, Robustness and Genetic Interactions in Digital Organisms", *Nature*, 400: 661-664, 1999.
- Lund, H., J. Hallam y W. Lee, "A Hybrid GP/GA Approach for Co-Evolving Controllers and Robot Bodies to Achieve Fitness-Specified Tasks", *Proceedings of IEEE, 3rd International Conference on Evolutionary Computation*, IEEE Press, Piscataway, 1996.
- Mahfoud, S. W., *Niching Methods for Genetic Algorithms*, tesis de doctorado, Urbana-Campaign, University of Illinois, 1995.
- Moravec, H., *Robot — From Mere Machine to Transcendent Mind*, Oxford University Press, Oxford, 1999.
- Nolfi, S., "Evolving Non-Trivial Behaviors on Real-Robots: A Garbage Collecting Robot", *Robotics and Autonomous Systems*, 22: 187-198, 1992.
- Pollack, J. B., y A. D. Blair, "Co-Evolution in the Successful Learning of Backgammon Strategy", *Machine Learning*, 32: 225-240, 1998.
- Rechenberg, I., *Evolutionsstrategie: Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution*, Frommann-Holzboog, Stuttgart, 1973.
- Sims, K., "Evolving 3D Morphology and Behavior by Competition", en R. Brooks y P. Maes (comps.), *Artificial Life IV*, MIT Press, Cambridge, 1994.
- Smith, J. M., "Byte-Sized Evolution", *Nature*, 355: 772-773, 1992.
- Swinson, M., "Mobile Autonomous Robot Software", Report BAA-99-09, Defense Advanced Research Projects Agency (DARPA), Arlington, 1998.
- Watson, R. A., S. G. Ficici y J. B. Pollack, "Embodied Evolution: Embodying an Evolutionary Algorithm in a Population of Robots", en P. Angeline et al. (comps.), *Proceedings of the 1999 Congress on Evolutionary Computation*, IEEE Computer Society Press, Silver Spring, 1999, pp. 355-342.
- Ziemelis, K., "Putting it on Plastic", *Nature*, 393: 619-620, 1998.

David Deamer

XX. ¿UN PASO GIGANTESCO HACIA LA VIDA ARTIFICIAL?*

PASO A PASO, los investigadores han estado ensamblando los componentes de una forma de vida celular artificial. Es posible formar vesículas lipídicas del tamaño de las baterías pequeñas, que en ciertas condiciones son capaces de crecer y dividirse, y de volver a crecer. Las enzimas de polimerasa encapsuladas en estas vesículas pueden sintetizar el ARN de sustratos agregados desde el exterior. Recientemente, todo el aparato de traducción, incluidos los ribosomas, se ha capturado en vesículas. De esta manera se pudieron producir cantidades considerables de proteínas, incluida la proteína verde fosforescente que se utiliza como marcador en la síntesis proteínica. ¿Podemos ya ensamblar una célula viviente? Todavía no, porque nadie ha producido una polimerasa que se reproduzca junto con la reproducción de los demás componentes moleculares que se requieren para la vida. Pero nunca habíamos estado más cerca de lograrlo.

INTRODUCCIÓN

El análisis filogenético ha determinado que las primeras formas de vida fueron microorganismos similares a las bacterias actuales. Se han descubierto sus vestigios fosilizados en rocas australianas que datan de por lo menos 3 500 millones de años, y las firmas isotópicas de Groenlandia indican que la vida pudo haber existido todavía antes, aproximadamente hace 3 800 millones de años.¹ Desde los tiempos del inicio de la vida la maquinaria de la vida se ha vuelto más compleja. Por ejemplo, cuando los investigadores pudieron aislar los genes de una de las especies bacterianas conocidas, establecieron un límite de ~ 265-350 genes que al

* Este capítulo apareció originalmente en *Trends in Biotechnology*, 23 (7): 336-338, 2005. © Elsevier.

¹ S. J. Mojzsis *et al.*, "Evidence for Life on Earth before 3 800 Million Years Ago", *Nature*, 384: 55-59, 1996.

parecer son absolutamente necesarios para la existencia de las células microbianas contemporáneas.²

Pero la vida no surgió con el conjunto completo de 300 + genes, los ribosomas, los sistemas de transporte vía membranas, el metabolismo y la transferencia ADN → ARN → proteínica de la información que predomina en toda la vida conocida hoy. Tuvo que haber existido algo más sencillo, una especie de andamiaje vital que se desechó en la basura de la evolución. ¿Podríamos nosotros deducir la naturaleza de ese andamiaje y luego ponerlo a prueba experimentalmente? Una posibilidad es el concepto de “Mundo de ARN”, que surgió del descubrimiento de las moléculas catalíticas de ARN, a las cuales se les dio el nombre de ribozimas. El hecho de que la información genética y una región catalítica puedan combinarse en la misma molécula significa que el ARN por sí mismo pudo haber funcionado en la misma forma que lo hacen actualmente el ADN, el ARN y las proteínas. La tesis del mundo de ARN se fortaleció mucho cuando se descubrió que el sitio catalítico de los ribosomas no se compone de proteínas, sino que es una diminuta máquina de ARN. Ésta es una prueba convincente de que el ARN probablemente apareció primero y luego se revistió de una maquinaria más compleja y más eficiente de proteínas.³

Hoy se ha iniciado otra forma de entender el origen de la vida. En vez de susstraer los genes de un organismo existente, los investigadores actualmente intentan incorporar un gen o unos cuantos genes en las microscópicas vesículas lipídicas a fin de producir sistemas moleculares que posean las propiedades de la vida. Estas propiedades podrían entonces proporcionar pistas sobre el proceso mediante el cual la vida surgió en un escenario natural en la Tierra primigenia.

DEFINICIÓN DE LA VIDA ARTIFICIAL

¿Qué haría un sistema de ese tipo? Podemos responder esta pregunta listando los pasos que requeriría un microorganismo para emerger como la primera forma de vida celular en la Tierra primigenia:

- i) Las membranas externas se autoensamblan a partir de moléculas jabonosas para formar compartimientos microscópicos de tipo celular.

² C. A. Hutchison *et al.*, “Global Transposon Mutagenesis and a Minimal *Mycoplasma* Genome”, *Science*, 286 (5447): 2165-2169, 1999.

³ L. Hoang, K. Fredrick y H. F. Noller, “Creating Ribosomes with an All-RNA 30S Subunit P Site”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101 (34): 12439-12443, 2004.

- ii)* Las membranas captan la energía, ya sea a partir de la luz y un sistema de pigmentos, ya sea de la energía química, o de ambas cosas.
- iii)* Los gradientes de concentración iónica se generan y mantienen en toda la membrana y pueden servir como fuente principal de energía metabólica.
- iv)* Las macromoléculas se encapsulan en los compartimientos, pero las moléculas más pequeñas pueden atravesar la membrana, proporcionando los nutrientes y la energía química para el metabolismo primitivo.
- v)* Las macromoléculas crecen mediante la polimerización de las moléculas de los nutrientes.
- vi)* Surgen por evolución catalizadores macromoleculares que aceleran el proceso de crecimiento.
- vii)* Los catalizadores macromoleculares mismos se reproducen durante el crecimiento.
- viii)* La información genética se codifica en la secuencia de monómeros de una serie de polímeros.
- ix)* La información se utiliza para dirigir el crecimiento de los polímeros catalíticos.
- x)* El sistema de macromoléculas circunscrito por la membrana puede dividirse en estructuras más pequeñas que siguen creciendo.
- xi)* La información genética se pasa de una generación a otra mediante la duplicación de las secuencias de los genes que heredan las células hijas.
- xii)* Ocasionalmente ocurren errores (mutaciones) durante la replicación o la transmisión de la información, a fin de que el sistema pueda evolucionar mediante la selección natural.

Viendo esta lista, a uno le impresiona la complejidad incluso de la forma de vida más sencilla. Por esta razón ha sido tan difícil “definir” la vida, en el sentido usual de una definición —es decir, reducida a unas cuantas frases en un diccionario—. La vida es un sistema complejo que no es posible captar en unas cuantas frases, de manera que dar una lista de sus propiedades conocidas es lo mejor que podemos esperar hacer.

LA VIDA EN EL LABORATORIO

A uno también le impresiona el hecho de que todas, menos una, de las funciones listadas ya han sido reproducidas en el laboratorio. Hace 40 años se demostró que

las vesículas lipídicas se autoensamblan como membranas de dos capas que mantienen los gradientes iónicos.⁴ Las vesículas pueden crecer gracias a la agregación de lípidos e incluso se les puede obligar a dividirse mediante la imposición de fuerzas transversales, después de lo cual las vesículas crecen nuevamente.⁵ Si hay bacteriorrodopsina en la doble capa, la energía de la luz puede capturararse como un gradiente de protones. Si hay una ATP sintetasa en la membrana, el sistema fotosintético puede acoplar la energía del gradiente de protones a la síntesis de un enlace de pirofosfato entre el ADP y el fosfato, formando ATP.⁶ Las macromoléculas, tales como las proteínas y los ácidos nucleicos, pueden encapsularse fácilmente.⁷

Y, finalmente, las macromoléculas como el ARN⁸ y las proteínas pueden sintetizarse dentro de las vesículas lipídicas. El primer intento de ensamblar un sistema de traducción en las vesículas lo realizó Oberholzer y sus colegas.⁹ Sin embargo, sólo se sintetizaron pequeñas cantidades de péptidos, principalmente porque la doble capa lipídica era impermeable a los aminoácidos. Esto limitaba la traducción ribosómica al reducido número de aminoácidos encapsulados dentro de las vesículas. Yu¹⁰ y Nomura¹¹ aumentaron el número de aminoácidos participantes mediante la utilización de vesículas más grandes, demostrando así que la GFP puede sintetizarse mediante un sistema de traducción encapsulado. Más recientemente, Noireaux y Libchaber¹² publicaron una elegante solución al dilema de la impermeabilidad de la doble capa, disgregando las bacterias y capturando muestras del citoplasma bacteriano en vesículas lipídicas. En estas muestras había ribosomas, varios ARNt y otros componentes necesarios para la síntesis proteínica. Los inves-

⁴ A. D. Bangham, M. M. Standish y N. Miller, "Cation Permeability of Phospholipids Model Membranes: Effect of Narcotics", *Nature*, 208: 1295-1297, 1965.

⁵ M. M. Hanczyc, S. M. Fujikawa y J. W. Szostak, "Experimental Models of Primitive Cellular Compartments: Encapsulation, Growth and Division", *Science*, 302 (5645): 618-622, 2003.

⁶ E. Racker y W. Stoerkenius, "Reconstitution of Uptake and Adenosine Triphosphate Formation", *Journal of Biological Chemistry*, 249: 662-633, 1974.

⁷ R. Shew y D. W. Deamer, "A Novel Method for Encapsulation of Macromolecules in Liposomes", *Biochimica et Biophysica Acta*, 816: 1-8, 1985.

⁸ A. Chakrabarti et al., "RNA Synthesis by a Liposome-Encapsulated Polymerase", *Journal of Molecular Evolution*, 39: 555-559, 1994.

⁹ T. Oberholzer, K. H. Nierhaus y P. L. Luisi, "Protein Expression in Liposomes", *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 261: 238-241, 1999.

¹⁰ W. Yu et al., "Synthesis of Functional Protein in Liposome", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92 (6): 590-593, 2001.

¹¹ S. Nomura et al., "Gene Expression within Cell-Sized Lipid Vesicles", *ChemBioChem*, 4 (11): 1171-1175, 2003.

¹² V. Noireaux y A. Libchaber, "A Vesicle Bioreactor as a Step toward an Artificial Cell Assembly", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101: 17669-17674, 2004.

tigadores entonces escogieron cuidadosamente dos genes para traducirlos, uno para la GFP y otro para una proteína formadora de poros llamada α -hemolisina. Si el sistema funcionaba como se esperaba, la GFP se acumularía en las vesículas como un marcador visual de la síntesis proteínica, y la hemolisina permitiría que los “nutrientes” agregados externamente como aminoácidos y ATP —la fuente de energía universal que se requiere para la síntesis proteínica— atravesaran la membrana y abastecieran al proceso de traducción con energía y monómeros (figura XX.1). El sistema funcionó como se esperaba. Las vesículas empezaron a resplandecer, mostrando la clásica fluorescencia verde de la GFP, y el transporte de nutrientes a través del poro de la hemolisina permitió que la síntesis continuara durante cuatro días.

El siguiente paso obvio consistió en incorporar un sistema de transcripción de genes y una síntesis proteínica en las vesículas lipídicas. Esto lo logró el año pasado Ishikawa,¹³ ensamblando una red genética de dos etapas con liposomas en que el gen de una polimerasa de ARN se expresó primero y luego la polimerasa se utilizó para producir el ARNm necesario para la síntesis de la GFP.

¿UN SEGUNDO ORIGEN DE LA VIDA?

¿Podemos ya sintetizar la vida? Todo lo que al parecer queda por hacer es conjuntar los procesos individuales e integrarlos en un sistema completo y así tendremos un segundo origen de la vida, 3 800 millones de años después del primero, pero esta vez en un laboratorio. No obstante, ¿será este sistema un sistema realmente viviente? Esta pregunta nos lleva nuevamente hasta esa única excepción que antes mencionamos. Todos los componentes en el sistema crecen y se reproducen, excepto las macromoléculas catalíticas mismas, las enzimas polimerasas o los ribosomas. Todas las demás partes del sistema son capaces de crecer y de reproducirse, pero los catalizadores quedan rezagados.

Éste es el reto final: encapsular un sistema de macromoléculas que puedan multiplicarse, una versión molecular de la máquina replicadora de Von Neumann.¹⁴ ¿Hay esperanzas de lograrlo? La respuesta es que sí, que existe un tenue rayo de esperanza. Utilizando una técnica desarrollada para la selección y la evolución

¹³ K. Ishikawa *et al.*, “Expression of a Cascading Genetic Network within Liposomes”, *FEBS Letters*, 576: 387-390, 2004.

¹⁴ J. von Neumann, *Theory of Self-reproducing Automata*, University of Illinois Press, Chicago, 1966.

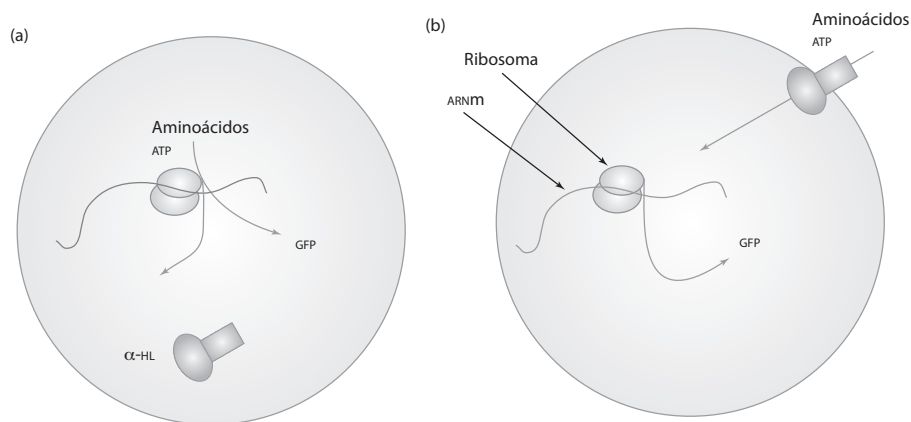


FIGURA XX.1. Traducción en un microambiente.

En (a) los aminoácidos y el ATP encapsulados en el volumen de la vesícula se utilizan para hacer pequeñas cantidades de GFP y α -hemolisina (α -HL). La membrana impide el acceso de los aminoácidos externos y del ATP, de manera que en el sistema rápidamente se agotan los “nutrientes” atrapados en la vesícula. Sin embargo, siendo la α -HL una proteína formadora de poros, emigra a la membrana y ensambla un heptámero con un poro lo suficientemente grande como para permitir que los aminoácidos y el ATP ingresen en la vesícula. Ahora el sistema puede sintetizar cantidades significativas de nuevas proteínas y la vesícula empieza a mostrar un fulgor verde debido a la acumulación de la GFP (b). Algo similar debió de haber ocurrido en la vía al origen de la vida celular a fin de que las primeras células tuvieran acceso a los nutrientes disponibles en el medio ambiente. © Trends in Biotechnology.

moleculares del ARN, David Bartel y sus colegas¹⁵ han producido una ribozima que puede crecer mediante la copia en su propia estructura de una secuencia de bases. Hasta la fecha, la polimerización sólo ha podido copiar una cadena corta de nucleótidos, pero es un buen inicio. Si se logra descubrir un sistema de ribozimas que catalice su propia síntesis completa utilizando la información genética codificada en su estructura, se podría decir con seguridad que posee la propiedad esencial de la autorreplicación. No es difícil imaginar su incorporación en las vesículas lipídicas a fin de producir una célula sencilla que tenga las propiedades básicas del estado viviente. La posibilidad de la vida en un tubo de ensayo siempre ha parecido estar a la vuelta de la esquina, y la esquina parece estar más cerca que nunca.

¹⁵ W. K. Johnston *et al.*, “RNA-Catalyzed RNA Polymerization: Accurate and General RNA-Templated Primer Extension”, *Science*, 292: 1319-1325, 2001.

BIBLIOGRAFÍA

- Banghman, A. D., M. M. Standish y N. Miller, "Cation Permeability of Phospholipids Model Membranes: Effect of Narcotics", *Nature*, 208: 1295-1297, 1965.
- Chakrabarti, A., R. Breaker, G. F. Joyce y D. W. Deamer, "RNA Synthesis by a Liposome-Encapsulated Polymerase", *Journal of Molecular Evolution*, 39: 555-559, 1994.
- Hanczyc, M. M., S. M. Fujikawa y J. W. Szostak, "Experimental Models of Primitive Cellular Compartments: Encapsulation, Growth and Division", *Science*, 302 (5645): 618-622, 2003.
- Hoang, L., K. Frederik y H. F. Noller, "Creating Ribosomes with an All-rRNA 30S Subunit P Site", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101 (34): 12439-12443, 2004.
- Hutchison, C. A., S. N. Peterson, S. R. Gill, R. T. Cline, O. White, C. M. Fraser, H. O. Smith y J. C. Venter, "Global Transposon Mutagenesis and a Minimal Mycoplasma Genome", *Science*, 286 (5447): 2165-2169, 1999.
- Ishikawa, K., K. Sato, Y. Shima, I. Urabe y T. Yomo, "Expression of a Cascading Genetic Network within Liposomes", *FEBS Letters*, 576: 387-390, 2004.
- Johnston, W. K., P. J. Unrau, M. S. Lawrence, M. E. Glasner y D. P. Bartel, "RNA-Catalyzed RNA Polymerization: Accurate and General RNA-Templated Primer Extension", *Science*, 292: 1319-1325, 2001.
- Mojzsis, S. J., G. Arrhenius, K. D. McKeegan, T. M. Harrison, A. P. Nutman y C. R. L. Fierend, "Evidence for Life on Earth before 3 800 Million Years Ago", *Nature*, 384: 55-59, 1996.
- Noireaux, V., y A. Libchaber, "A Vesicle Bioreactor as a Step toward an Artificial Cell Assembly", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101: 17669-17674, 2004.
- Nomura, S., K. Tsumoto, T. Hamada, K. Akiyoshi, Y. Nakatani y K. Yoshikawa, "Gene Expression within Cell-Sized Lipid Vesicles", *ChemBioChem*, 4 (11): 1171-1175, 2003.
- Oberholzer, T., K. H. Nierhaus y P. L. Luisi, "Protein Expression in Liposomes", *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 261: 238-241, 1999.
- Racker, E., y W. Stoeckenius, "Reconstitution of Uptake and Adenosine Triphosphate Formation", *Journal of Biological Chemistry*, 249: 662-633, 1974.
- Shew, R., y D. W. Deamer, "A Novel Method for Encapsulation of Macromolecules in Liposomes", *Biochimica et Biophysica Acta*, 816: 1-8, 1985.
- Von Neumann, J., *Theory of Self-reproducing Automata*, University of Illinois Press, Chicago, 1966.
- Yu, W., K. Sato, M. Wakabayashi, T. Nakaishi, E. P. Ko-Mitamura, Y. Shima, I. Urabe y T. Yomo, "Synthesis of Functional Protein in Liposome", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92 (6): 590-593, 2001.

Pier Luigi Luisi, Francesca Ferri
y Pasquale Stano*

XXI. LAS CÉLULAS MÍNIMAS SEMISINTÉTICAS EXPERIMENTALES: UN RESUMEN**

LA NOCIÓN DE UNA CÉLULA MÍNIMA

Las células vivientes más sencillas que existen en la Tierra poseen varios cientos de genes que a su vez codifican cientos de proteínas, las cuales, más o menos simultáneamente, catalizan cientos de reacciones dentro del mismo minúsculo compartimento —una complejidad tan asombrosa como enorme—.

Esta imagen de la célula suscita la pregunta de si tal complejidad es o no realmente esencial para la vida, o si sería posible que la vida celular fuera posible con una cantidad mucho menor de componentes. Las células primigenias no pudieron haber sido tan complejas. La enorme complejidad de las células modernas es probablemente el resultado de miles de millones de años de evolución, en que se desarrollaron una serie de mecanismos de defensa y seguridad, de redundancias y de ciclos metabólicos (los cuales, en esas condiciones tan permisivas, probablemente no eran necesarios). De estas consideraciones se derivó la noción de la célula mínima, hoy definida en términos generales como una célula que posee la suficiente cantidad mínima de componentes como para que se la considere una célula viviente. Tal cosa automáticamente precede a la siguiente pregunta, tan fundamental como compleja: “¿qué significa ‘viviente’?” Uno podría optar por una definición general, y definir la vida celular como la conjunción de tres propiedades básicas: el automantenimiento (el metabolismo), la autorreproducción y la capacidad de evolucionar (figura XXI.1).

La capacidad de evolucionar es una noción darwiniana. Ésta se relaciona más con las poblaciones que con las células individuales. Consecuentemente, uno tiene que tomar en consideración toda una familia de células mínimas que

* Este capítulo apareció originalmente en *Naturwissenschaften*, 93 (1): 1-13, 2006. Reproducido con la autorización de Springer+Business Media B. V.

** Los autores agradecen el apoyo económico del Centro de Estudios Enrico Fermi (Roma) y de cost D27 Action.

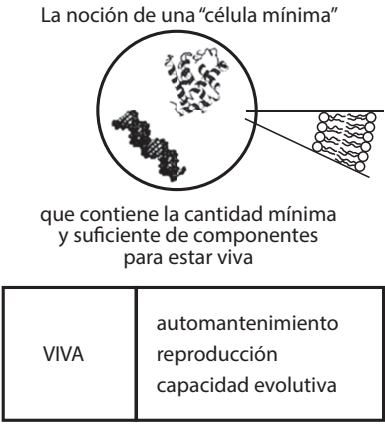


FIGURA XXI.1. La noción de la célula mínima.

Como se expuso en el texto, esta definición no describe una estructura en particular, sino que más bien es un término que describe una amplia variedad de células mínimas.

experimenta el flujo de las presiones ambientales y la correspondiente evolución genética.

Acaso no sea posible implementar perfectamente esta trilogía definitoria de la vida celular en las estructuras sintéticas, así que podemos imaginar diversos tipos de aproximaciones a la vida celular. Por ejemplo, puede haber protocélulas que sean capaces del automantenimiento pero no de la autorreproducción, o viceversa. O puede haber protocélulas en que la autorreproducción funcione durante sólo unas cuantas generaciones, o sistemas que no sean capaces de evolucionar. En el caso de cualquier tipo dado de célula mínima (es decir, una que tuviera los tres atributos), podrían existir formas muy diferentes de implementación y sofisticación. De manera que obviamente el término “célula mínima” implica amplias familias de posibilidades y no simplemente una estructura en particular. Sin embargo, es importante tener en cuenta que aquí no simplemente consideramos las posibilidades teóricas, sino una cuestión nueva: un planteamiento biológico-sintético y una metodología de implementación experimental específica.

Se ha reflexionado a través de los años en la cuestión de la célula mínima. Hay que recordar, en especial, las investigaciones de Morowitz,¹ quien calculó, con base en los componentes enzimáticos del metabolismo primigenio, que la dimensión de una célula mínima debía ser un décimo menor que la *Mycoplasma*

¹ H. J. Morowitz, “Biological Self-replicating Systems”, en F. M. Snell (comp.), *Progress in Theoretical Biology*, vol. I, Academic Press, Nueva York, 1967, pp. 35-38.

genitalium. Anteriormente, otras ideas significativas al respecto las propusieron Jay y Gilbert,² Woese,³ y Dyson.⁴ Más recientemente, las observaciones de Pohorille y Deamer,⁵ Luisi,⁶ y Oberholzer y Luisi⁷ han resaltado la cuestión con la perspectiva de las herramientas moleculares modernas. De hecho, en los últimos años se ha renovado el interés en el dominio de la célula mínima. En este capítulo queremos examinar las investigaciones que se han realizado al respecto, resaltando las cuestiones empíricas. Desde hace algunos años, en la bibliografía sobre este tema se han expuesto muchas teorías acerca de las formas de vida mínimas, pero este resumen no las examinará no porque carezcan de interés para nosotros, sino porque aquí deseamos enfocar el arte de la biología sintética de las células mínimas. La idea de hacer un resumen sobre el tema también se derivó del renovado interés en el campo de la célula mínima que se ha dado en los últimos años, y que se ha documentado, por ejemplo, en las dos conferencias internacionales sobre el tema que tuvieron lugar el año pasado.⁸

A fin de ubicar este trabajo en una perspectiva más concreta, será útil examinar primero los organismos unicelulares más pequeños en la Tierra, enfocando la noción del genoma mínimo.

EL GENOMA MÍNIMO

La figura XXI.2 compara la distribución de las dimensiones de los genomas que se han calculado mediante una serie de supuestas⁹ procariotas de vida libre, parásitos obligados, termófilas y endosimbiontes de vida libre. El contenido del ADN de

² D. G. Jay y W. Gilbert, "Basic Protein Enhances the Encapsulation of DNA into Lipid Vesicles: Model for the Formation of Primordial Cells", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 84 (7): 1978-1980, 1987.

³ C. R. Woese, "The Primary Lines of Descent and the Universal Ancestor", en D. S. Bendall (comp.), *Evolution from Molecules to Man*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983, pp. 209-233.

⁴ F. J. Dyson, "A Model for the Origin of Life", *Journal of Molecular Evolution*, 18: 344-350, 1982.

⁵ A. Pohorille y D. Deamer, "Artificial Cells: Prospects for Biotechnology", *Trends in Biotechnology*, 20: 123-128, 2002.

⁶ P. L. Luisi, "Toward the Engineering of Minimal Living Cells", *Anatomical Record*, 268: 208-214, 2002.

⁷ T. Oberholzer y P. L. Luisi, "The Use of Liposomes for Constructing Cell Models", *Journal of Biological Physics*, 28: 733-744, 2002.

⁸ Los encuentros internacionales fueron el Third COST D27 Workshop, que tuvo lugar en Creta en octubre de 2004 (http://cost.cordis.lu/src/action_detail.cfm?action=D27) y The International School on Complexity, que tuvo lugar en Erice, Sicilia, en diciembre de 2004 (<http://www.ccsem.infn.it>). Véase también E. Szathmáry, "Life: In Search of the Simplest Cell", *Nature*, 433: 469-470, 2005.

⁹ S. Islas *et al.*, "Comparative Genomics and the Gene Complement of a Minimal Cell", en *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, 34: 243-256, 2004.

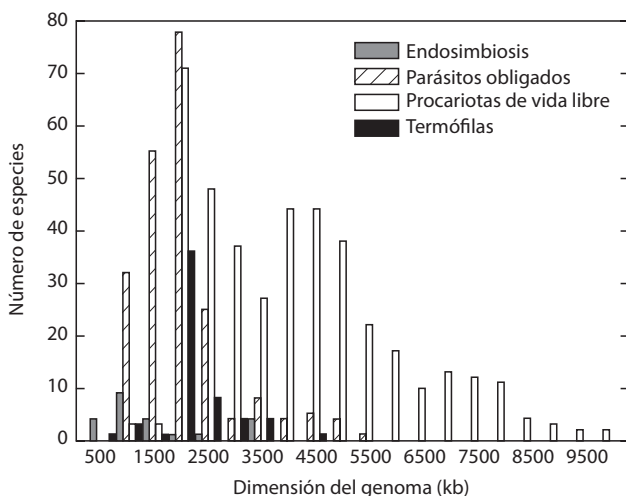


FIGURA XXI.2. Distribución dimensional ($N = 641$) de los genomas procariotas. Las dimensiones genómicas, los proteomas completos y el número de marcos abiertos de lectura fueron todos extraídos del National Center for Biotechnology Information (ncbi.nlm.nih.gov). (Esta figura es una adaptación de la que aparece en Islas et al., op. cit.)

las células procariotas de vida libre es variable, desde 1 450 kb para *Halomonas halmophila* hasta 9 700 kb para *Azospirillum lipoferum* Sp59b. En comparación, *Escherichia coli* K-12 tiene una dimensión genómica de aproximadamente 4 640 kb y *Bacillus subtilis* de 4 200 kb.

La clasificación de los endosimbiontes indica que el contenido de su ADN puede ser significativamente menor; las dimensiones más pequeñas son las de *M. genitalium* y *Buchnera*, con un valor que confirma las predicciones de Shimkets,¹⁰ quien afirma que la dimensión genómica mínima de un organismo de vida libre debe ser de aproximadamente 600 kb. Se alega que estos dos organismos han experimentado pérdidas masivas de genes y que sus limitadas capacidades codificadoras se deben a su adaptación a los medios intracelulares muy permisivos que les proporcionan sus huéspedes.¹¹

¹⁰ L. J. Shimkets, "Structure and Sizes of Genomes of the Archaea and Bacteria", en F. J. de Bruin, J. R. Lupskin y G. M. Weinstock (comps.), *Bacterial Genomes: Physical Structure and Analysis*, Kluwer, Boston, 1998, pp. 5-11.

¹¹ S. Islas et al., op. cit.

¿QUÉ SIGNIFICAN ESTAS CIFRAS EN RELACIÓN
CON EL NÚMERO DE GENES MÍNIMO?

El cuadro XXI.1, que también extrajimos de Islas y sus colegas,¹² registra el número de regiones codificadoras en algunos genomas pequeños. El cuadro también muestra los genes redundantes, que constituyen entre 6 y 20% del genoma total. ¿Cómo puede uno utilizar los datos del cuadro XXI.1 para hacerse una idea de las otras posibles simplificaciones del genoma?

En Valencia, Gil y sus colegas,¹³ se hicieron esta pregunta y llegaron a un número menor, 206 genes, basando esta cifra en su investigación de *Buchnera* spp. y otros organismos. Los resultados se dan en el cuadro XXI.2.

Advirtamos que las cifras proporcionadas por Gil y sus colegas se aproximan a las que obtuvieron otros autores con base en consideraciones distintas, como se ve en el cuadro XXI.3, el cual registra los datos más significativos en relación con los cálculos y las observaciones del genoma mínimo. De hecho, la cuestión del genoma mínimo ha sido investigada por Mushegian,¹⁴ Shinkets,¹⁵ Mushegian y Koonin,¹⁶ Kolisnychenko y sus colegas¹⁷ y Koonin.¹⁸ En particular, Mushegian y Koonin¹⁹ calcularon un inventario de 256 genes, que representan la cantidad de ADN necesaria para sustentar un tipo moderno de célula mínima en condiciones permisibles. Esta cifra, como lo indicó posteriormente Koonin,²⁰ es muy similar a los valores de las dimensiones de los genomas mínimos viables que se infieren de la disrupción de genes sitio-dirigidas en *B. subtilis*²¹ y en la mutagénesis por trans-

¹² *Ibid.*

¹³ R. Gil *et al.*, "Determination of the Core of a Minimal Bacteria Gene Set", *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 68: 518-537, 2004.

¹⁴ A. Mushegian, "The Minimal Genome Concept", *Current Opinion in Genetics and Development*, 9 (6): 709-714, 1999.

¹⁵ L. J. Shinkets, *op. cit.*

¹⁶ A. Mushegian y E. V. Koonin, "A Minimal Gene Set for Cellular Life Derived by Comparison of Complete Bacterial Genomes", *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 93 (19): 10268-10273, 1996.

¹⁷ V. Kolisnychenko y E. V. Koonin, "Engineering a Reduced *Escherichia coli* Genome", *Genome Research*, 12 (4): 640-647, 2002.

¹⁸ E. V. Koonin, "How Many Genes Can Build a Cell: The Minimal-Gene-Set Concept", *Annual Review of Genomics and Human Genetics*, 1: 99-116, 2000; E. V. Koonin, "Comparative Genomics, Minimal Gen-Sets and the Last Universal Common Ancestor", *National Review of Microbiology*, 1: 127-136, 2003.

¹⁹ A. Mushegian y E. V. Koonin, *op. cit.*

²⁰ E. V. Koonin, "How Many Genes Can Build a Cell: The Minimal-Gene-Set Concept", *op. cit.*; E. V. Koonin, "Comparative Genomics, Minimal Gen-Sets and the Last Universal Common Ancestor", *op. cit.*

²¹ M. Itaya, "An Estimation of the Minimal Genome Size Required for Life", *FEBS Letters*, 362 (39): 257-260, 1995.

CUADRO XXI.1. *Redundancia de genes en los genomas pequeños de los endosimbiontes y los parásitos obligados**

<i>Proteoma</i>	<i>Dimensión del genoma (kb)</i>	<i>Número de marcos abiertos de lectura (ORF)**</i>	<i>Número de secuencias redundantes</i>	<i>Redundancia (%)</i>
<i>Mycoplasma genitalium</i>	580	480	52	10.83
<i>Mycoplasma pneumoniae</i>	816	688	134	19.48
<i>Buchnera</i> sp. APS	640	574	67	11.67
<i>Ureaplasma urealyticum</i>	751	611	105	17.08
<i>Chlamydia trachomatis</i>	1 000	895	60	6.70
<i>Chlamydia muridarum</i>	1 000	920	60	6.52
<i>Chlamydophila pneumoniae</i>				
J138	1 200	1 070	148	13.83
<i>Rickettsia prowazekii</i>	1 100	834	49	5.88
<i>Rickettsia conorii</i>	1 200	1 366	189	13.84
<i>Treponema pallidum</i>	1 100	1 031	78	7.57

* Las dimensiones de los genomas, los proteomas completos y el número de ORF se extrajeron del National Center for Biotechnology Information (<http://www.ncbi.nih.gov>).

** ORF = Open reading frames [marcos abiertos de lectura].

posones en *M. genitalium* y *Mycoplasma pneumoniae*.²² En relación con este último trabajo, recordemos que la noción del “genoma mínimo” se plantea de una manera muy diferente por Hutchinson y sus colegas. En una investigación que se realizó en el Institute for Genomic Research de Rockville, MD, Hutchinson y sus colegas redujeron uno por uno los genes de la bacteria *M. genitalium*, calculando que de las 480 regiones de codificación proteica, cerca de 265-350 son esenciales bajo las condiciones de cultivo en el laboratorio, en los cuales se incluyen cerca de 100 genes cuyas funciones se desconocen.²³

Yendo un paso más allá, la idea consistía en eliminar en la bacteria el material genético original y en insertar el sintético a fin de ver si funcionaba o no.²⁴ Esta práctica ya había sido utilizada por Cello y sus colegas²⁵ en la Universidad de Stony Brook para crear un virus de polio infeccioso que es mucho más sencillo que una bacteria.

²² C. A. Hutchison *et al.*, “Global Transposon Mutagenesis and a Minimal Mycoplasma Genome”, *Science*, 268 (5447): 2165-2169, 1999.

²³ *Ibid.*

²⁴ C. Zimmer, “Tinker, Tailor: Can Venter Stich Together a Genome from Scratch?”, *Science*, 299: 1006-1007, 2003.

²⁵ J. Cello, A. V. Paul y E. Wimmer, “Chemical Synthesis of Poliovirus cDNA: Generation of Infectious Virus in the Absence Approach”, *Science*, 297 (5583): 1016-1018, 2002.

CUADRO XXI.2. *Serie de los genes principales de una bacteria mínima**

Metabolismo ADN	16
Maquinaria de replicación básica	13
Reparación, restricción y modificación del ADN	3
Metabolismo ARN	106
Maquinaria de transcripción básica	8
Traducción: síntesis de aminoacil-ARNt	21
Traducción: maduración y modificación del ARNt	6
Traducción: proteínas ribosomales	50
Traducción: función, maduración y modificación del ribosoma	7
Factores de traducción	12
Degradación del ARN	2
Procesamiento, plegamiento y secreción de las proteínas	15
Modificación postraducción de las proteínas	2
Plegamiento de las proteínas	5
Translocación y secreción de las proteínas	5
Remplazo de proteínas	3
Procesos celulares	5
Metabolismo energético y secundario	56
Insuficientemente caracterizados	8
Total	343

* Cortesía del profesor A. Moya (Institut Cavanilles de Biodiversitat i Biologia Evolutiva, Universitat de València).

Hemos llegado a establecer la cifra de 200-300 genes para el genoma mínimo. Ésta es una simplificación considerable de la cifra inicial, pero se corresponde con una complejidad formidable, la cual, una vez más, incita la pregunta de si puede reducirse aún más, y cómo.

ESPECULACIONES SUPLEMENTARIAS

Obviamente, tan sólo las especulaciones nos pueden ayudar ahora. Imaginemos un tipo de reducción teórica del genoma que simultáneamente reduzca la complejidad celular y una parte de las funciones no esenciales.²⁶

²⁶ P. L. Luisi, T. Oberholzer y A. Lazcano, "The Notion of a DNA Minimal Cell: A General Discourse and Some Guidelines for an Experimental Approach", *Helvetica Chimica Acta*, 85: 1759-1777, 2002.

CUADRO XXI.3. *Investigaciones sobre el genoma mínimo*

Descripción del sistema	Objetivo principal y resultados	Referencias
La secuencia nucleótida completa del genoma <i>M. genitalium</i> (580 070 pb) se determinó mediante la secuenciación y el ensamblaje aleatorios del genoma-entero	Solamente se identificaron 470 de las regiones codificadoras pronosticadas (los genes necesarios para la replicación, transcripción y traducción; para la reparación del ADN; para el transporte celular; y para el metabolismo de la energía)	Fraser <i>et al.</i> ^a
Disrupción de genes sitio-dirigidas en <i>B. subtilis</i>	Se infirieron los valores de la dimensión viable del genoma mínimo	Itaya ^b
Las 468 secuencias proteicas pronosticadas de <i>M. genitalium</i> se compararon con las 1 703 secuencias proteicas codificadas por otro genoma bacteriano pequeño completamente secuenciado, el de <i>Haemophilus influenzae</i>	Una serie mínima de genes autosuficientes: los 256 genes que se conservan en las bacterias Gram positivas y Gram negativas casi sin lugar a dudas son esenciales en la función celular	Mushegian y Koonin ^c
Análisis computacional (cuantificación del contenido genético, de la expansión de la familia genética y de la conservación y desplazamiento de los genes ortólogos)	Se determinó que una serie cercana a 300 genes es la serie mínima para la vida celular	Mushegian ^d
Se utilizó la mutagénesis global con transposones para identificar los genes no esenciales del genoma de <i>Mycoplasma</i>	Entre 265 y 350 de los 480 genes codificadores de <i>M. genitalium</i> son esenciales en las condiciones de cultivo en el laboratorio, incluidos aproximadamente 100 genes cuya función se desconoce	Hutchison <i>et al.</i> ^e
Examen de varios trabajos teóricos y experimentales	El concepto de la serie de genes mínima	Koonin ^f
El artículo enfoca la noción de una célula mínima de ADN	Discusión del fondo conceptual del genoma mínimo	Luisi <i>et al.</i> ^g
Se sintetizó completamente el ADN del poliovirus mediante el ensamblaje de oligonucleótidos de polaridad de hebra positiva y negativa	Es posible crear sintéticamente un poliovirus infeccioso, el cual es mucho más sencillo que una bacteria, desde una aproximación sintética	Cello <i>et al.</i> ^h

^a C. M. Fraser *et al.*, "The Minimal Gene Complement of Mycoplasma Genitalium", *Science*, 570 (5235): 397-403, 1995.

^b M. Itaya, *op. cit.*

^c A. Mushegian y E. V. Koonin, *op. cit.*

^d A. Mushegian, *op. cit.*

^e C. A. Hutchinson *et al.*, *op. cit.*

^f E. V. Koonin, "How Many Genes Can Build a Cell: The Minimal-Gene-Set Concept", *op. cit.*

^g P. L. Luisi, T. Oberholzer y A. Lazcano, *op. cit.*

^h J. Cello, A. V. Paul y E. Wimmer, *op. cit.*

CUADRO XXI.3. *Investigaciones sobre el genoma mínimo [conclusión]*

<i>Descripción del sistema</i>	<i>Objetivo principal y resultados</i>	<i>Referencias</i>
Se desarrolló una técnica de cirugía genómica precisa y se aplicó para suprimir las islas K más grandes de <i>E. coli</i> que según la genómica comparativa son adquisiciones horizontales recientes del genoma	Se suprimieron exitosamente 12 islas K, lo cual produjo una reducción de 8.1% en la dimensión del genoma, una reducción de 9.3% de la cantidad de genes, y la eliminación de 24 de los 44 elementos transponibles de <i>E. coli</i> ; el objetivo consistía en construir una cepa reducida al máximo de <i>E. coli</i> que sirviera como un mejor organismo modelo	Kolisnychenko <i>et al.</i> ⁱ
Mapa físico de los genomas <i>Buchnera</i> a partir de cinco linajes de áfidos	Se sugiere que el genoma <i>Buchnera</i> aún experimenta un proceso reductor hacia la serie mínima de genes necesarios para su estilo de vida simbiótico	Gil <i>et al.</i> ^j
Métodos computacionales y experimentales de la genómica comparativa	Son comunes a toda la vida celular 60 proteínas; un grupo principal de 500-600 genes podrían representar la serie genética del último ancestro común universal	Koonin ^k
Se compararon los genomas de <i>Buchnera</i> y otros organismos	Se identificaron 206 genes como el grupo principal de una serie de genes mínima bacteriana	Gil <i>et al.</i> ^l
Genómica comparativa	Se realizaron cálculos de la dimensión del complemento genético mínimo para inferir las funciones biológicas primarias que se requieren para que una célula se sustente y reproduzca hoy en día (y lo haya hecho a través de la evolución histórica)	Islas <i>et al.</i> ^m

ⁱ V. Kolisnychenko y E.V. Koonin, *op. cit.*

^j R. Gil *et al.*, "Extreme Genome Reduction in *Buchnera* spp.: Toward the Minimal Genome Needed for Symbiotic Life", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99 (7): 4454-4458, 2002.

^k E. V. Koonin, "Comparative Genomics, Minimal Gen-Sets and the Last Universal Common Ancestor", *op. cit.*

^l R. Gil *et al.*, "Determination of the Core of a Minimal Bacteria Set", *op. cit.*

^m S. Islas *et al.*, *op. cit.*

La primera parada técnica en este juego intelectual consiste en imaginar una célula sin las enzimas (y luego sin sus genes correspondientes) que sean necesarias para sintetizar compuestos de bajo peso molecular —suponiendo que los compuestos de bajo peso molecular, incluso los nucleótidos y los aminoácidos, estuvieran disponibles en el entorno y fueran capaces de permear la membrana celular—. Ésta sería una célula mínima totalmente permeable. Las simplificaciones sucesivas²⁷ nos acercarían finalmente a una célula capaz de realizar las biosíntesis de las proteínas y los lípidos mediante un sistema ribosomal moderno, pero se limitarían a un número de enzimas bastante restringido (véase el cuadro XXI.4). Esta célula tendría cerca de 25 genes para toda la maquinaria sintética de ADN/ARN, cerca de 120 genes para toda la síntesis proteica (incluida la síntesis del ARN y 55 proteínas ribosomales) y cuatro genes para la síntesis de la membrana —lo cual nos da un total de aproximadamente 150 genes, cifra algo menor a la de 206 propuesta por Gil y sus colegas y que anteriormente indicamos—.

Gracias al abastecimiento externo de sustratos, una célula de este tipo debería ser capaz de automantenerse y autorreproducirse e incluso de replicar los componentes de la membrana. Sin embargo, no podría sintetizar los compuestos de bajo peso molecular ni poseer redundancias para su propia defensa y seguridad (de hecho, carecería de todos los mecanismos de la autorreparación). Además, la división celular se derivaría de un proceso estadístico físico.

Pero no existen pruebas de que sea viable esta estructura teórica, lo cual también es cierto respecto a los 206 genes de Gil y sus colegas. Sin embargo es conveniente proseguir con estos experimentos teóricos de reducción, haciendo de las proteínas ribosomales las siguientes víctimas. ¿Seremos capaces de noquearlas? Hay indicios de que las proteínas ribosomales acaso no sean esenciales para la síntesis proteica,²⁸ y también hay indicios de la existencia de un sistema de traducción antiguo más sencillo.²⁹

Desde luego, este tipo de discusión nos introduce directamente en la situación de las células primigenias cuando la vida se originó; de hecho, algunos afirman que los primeros ribosomas consistían simplemente en ARNr asociado con

²⁷ P. L. Luisi, T. Oberholzer y A. Lazcano, *op. cit.*

²⁸ B. Zhang y T. R. Cech, "Peptidyl-Transferase Ribozymes: Transreactions, Structural Characterization and Ribosomal RNA-like Features, *Chemical Biology*, 5: 539-553, 1998.

²⁹ C. T. Calderone y D. R. Liu, "Nuclei-Acid-Templated Synthesis as a Model System for Ancient Translation", *Current Opinion in Chemical Biology*, 8: 645-653, 2004; P. Nissen *et al.*, "The Structural Basis of Ribosome Activity in Peptide Bond Synthesis", *Science*, 289 (5481): 920-930, 2000.

CUADRO XXI.4. *Lista hipotética de productos génicos, ordenados según su categoría funcional, que precisa la célula mínima según las definiciones utilizadas en este capítulo*

<i>Producto génico</i>	<i>Cantidad de genes</i>		
	<i>Célula^a de ADN mínima</i>	<i>Célula “simple ribosomal”</i>	<i>Célula extremadamente reducida</i>
Metabolismo ADN/ARN			
Polimerasa III del ADN	4 ^b	4 ^b	1
Polimerasa del ARN dependiente del ADN	3 ^c	3 ^c	1
Primasa del ADN	1	1	1
Ligasa del ADN	1	1	1
Helicasas	2-3	2-3	1
Girasa del ADN	2 ^d	2 ^d	1
Proteínas fijadoras del ADN			
de hebra sencilla	1	1	1
Iniciador de la replicación cromosómica	1	1	1
Topoisomerasas I y IV del ADN	1 + 2 ^d	1 + 2 ^d	1
Helicasa del ARN, ATP-dependiente	1	1	
Factor de elongación de la transcripción	1	1	
RNasa (III, P)	2	2	
DNasa (endo/exo)	1	1	
Reductasa ribonucleótida	1	1	1
Biosíntesis proteica/aparato traductor			
Proteínas ribosomales	51	0	0
ARN ribosomal	1 ^e	1 ^e	1 ^e (autoempalme)
Sintetasas aminoacil-ARNt	24	24	14 ^f
Factores proteicos necesarios			
para la biosíntesis			
y la síntesis proteica de la membrana	9-12 ^g	9-12 ^g	3
ARNt	33	33	16 ^h
Metabolismo lipídico			
Aciltransferasa ‘plsX’	1	1	1
Aciltransferasa ‘plsC’	1	1	1
PG sintasa	1	1	1
Proteína portadora de acilo	1	1	1
Total	146-150	105-107	46

^a Basada en *M. genitalium*.

^b Subunidades a, b y tau.

^c Subunidades a, b y b’.

^d Subunidades a y b.

^e Un operón con tres funciones (ARNt).

^f Suponiendo un código reducido.

^g Incluido un potencial posiblemente limitado para sintetizar las proteínas de la membrana.

^h Suponiendo que la tercera base es irrelevante.

péptidos básicos.³⁰ Si aceptamos esto y eliminamos los 55 genes de las proteínas ribosomales, así como algunas otras enzimas, entonces tendríamos un número de aproximadamente 110 genes.

REDUCCIONES ADICIONALES

Una gran parte de los genes previstos corresponden a las polimerasas del ARN y ADN. Múltiples datos³¹ indican que sería posible un repertorio enzimático replicador simplificado, tanto como una versión simplificada de la síntesis proteica. En particular, es concebible la idea de que una sola polimerasa pudiera desempeñar los papeles de una polimerasa, una transcriptasa y una primasa de ADN en las células muy primitivas.³²

El juego podría continuar si supusiéramos que en la época de las células primitivas, no se implicaban “nuestros” 20 aminoácidos en su totalidad y que una cantidad menor de aminoácidos hubiera reducido la cantidad de sintetasas aminoacil-ARNt y de los genes del ARNT.

Todas estas consideraciones pueden ayudarnos a reducir el número de genes hasta, digamos, 45-50 genes (véase el cuadro XXI.4 para una célula viviente mínima, aunque algo coja).³³

Esta cifra es significativamente menor a la que propone el profesor Moya en el cuadro XXI.2, pero desde luego se basa en un mayor grado de especulación teórica. Muchos autores dudarían que una célula con tan sólo 45-50 genes pudiera funcionar. Pero hay que decir nuevamente que nuestro cálculo se refiere a las células primitivas y a la idea de que las primeras células no pudieron haber surgido con docenas de genes desde el principio mismo en el mismo compartimento. Esta última consideración permite un vínculo lógico con la noción de los compartimentos.

³⁰ A. M. Weiner y N. Maizels, “tRNA-like Structures Tag the 3 Ends of Genomic RNA Molecules for Replication: Implications for the Origin of Protein Synthesis”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 84: 7383-7387, 1987.

³¹ D. N. Frick y C. C. Richardson, “DNA Primases”, *Annual Review of Biochemistry*, 70: 39-80, 2001; A. Lazcano *et al.*, “The Evolutionary Transcription from RNA to DNA in Early Cells”, *Journal of Molecular Evolution*, 27: 283-290, 1988; A. Lazcano *et al.*, “On the Early Emergence of Reverse Transcription: Theoretical Basis and Experimental Evidence”, *Journal of Molecular Evolution*, 35: 534-536, 1992; D. P. Suttle y J. M. Ravel, “The Effects of Initiation Factor 3 on the Formation of 30S Initiation Complexes with Synthetic and Natural Messengers”, *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 57 (2): 386-393, 1974.

³² P. L. Luisi, T. Oberholzer y A. Lazcano, *op. cit.*

³³ *Ibid.*

Supongamos que estas 45-50 macromoléculas, o sus precursores, se desarrollaron inicialmente en una solución (olvidemos por el momento la posibilidad de los compartimentos). A fin de que se iniciara la vida celular, la compartimentación debió venir después, y por lo tanto uno tendría que suponer que todos estos genes diferentes quedaran atrapados simultáneamente en la misma vesícula. Tal cosa se podría considerar extremadamente improbable; de hecho, una situación en que la complejidad celular haya evolucionado desde el interior del compartimento es más razonable —una situación en que las 45 (o 206) macromoléculas se produjeran y evolucionaran a partir de un grupo mucho menor de componentes dentro de la fotocélula—.

Hasta ahora hemos llevado a cabo especulaciones sobre las células “normales” de proteína/ADN/ARN. Si realizamos un salto especulativo adicional, podríamos preguntar: “¿cómo sería en teoría una célula de ARN?” Consideremos brevemente esta cuestión antes de seguir adelante con las células usuales.

LA CÉLULA DE ARN MÍNIMA

Uno de los esquemas más sencillos que se corresponde con el criterio de la capacidad de evolución, el automantenimiento y la reproducción, es la llamada “célula de ARN” (figura XXI.3). Este objeto puramente teórico, desarrollado por Szostak y sus colegas,³⁴ representa una síntesis de los modelos del ARN y de la compartimentación.

En este caso, las propiedades “genéticas” y catalíticas combinadas de las ribozimas desarrollan un papel principal. La célula ARN consiste en una vesícula que contiene dos ribozimas: una con actividad de replicasa y la otra con actividad catalizadora para la síntesis de los componentes de la membrana. La primera ribozima es capaz de autorreplicarse; la segunda ribozima es replicada por la primera. Al mismo tiempo, un precursor se transforma en un componente formador de la membrana, permitiendo el crecimiento y la subsecuente división de la vesícula madre. En esta forma, se puede lograr una reproducción conjugada de la médula-y-concha del modelo entero.

Como se mencionó anteriormente, éste es un esquema hipotético basado en ribozimas aún-no-existentes y en una serie de suposiciones adicionales (por ejemplo, la permeabilidad total de la membrana para el precursor A y los nucleó-

³⁴ J. W. Szostak, D. P. Bartel y P. L. Luisi, “Synthesizing Life”, *Nature*, 409: 387-390, 2001.

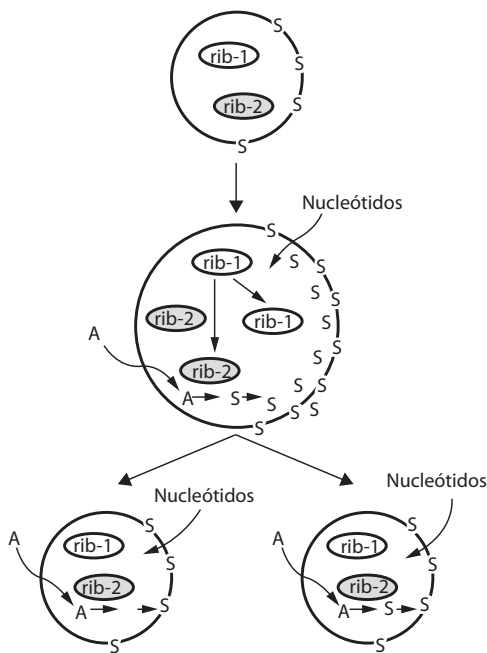


FIGURA XXI.3. La célula ARN con dos ribozimas.

Rib-1 es una ARN replicasa capaz de autorreproducirse y hacer copias de rib-2. Rib-2 es capaz de sintetizar la membrana celular mediante la transformación del precursor A en el formador S de la membrana. El entorno proporciona todos los componentes de bajo peso molecular que son necesarios para la síntesis macromolecular, componentes que son capaces de permear la membrana. (Figura modificada de P. L. Luisi, T. Oberholzer y A. Lazcano, op. cit.) En esta figura simplificada se representa una división celular ideal en que todos los componentes medulares en las nuevas vesículas son los mismos.

tidos, ambos presentes en grandes cantidades en el medio ambiente), o en la suposición de que la célula se divide, distribuyendo ambos tipos de ribozimas a las células hijas (de manera que en cada célula siempre haya ribozimas del primero y del segundo tipo).

En conclusión, el modelo de la figura XXI.3, aunque muy interesante por su sencillez, sigue siendo un modelo teórico, ya que aún no existen las dos ribozimas. Además, la célula ARN, en una situación real, tendría que evolucionar para formar la célula de proteína/ADN. A pesar de todas estas limitaciones, la célula ARN es muy interesante porque muestra, al menos teóricamente, que un número limitado de genes de ARN puede producir la vida celular.

HACIA LA CONSTRUCCIÓN DE LA CÉLULA DE PROTEÍNA/ADN MÍNIMA: PREPARACIÓN DEL TERRENO

Regresando a la discusión sobre el fondo teórico-práctico de la producción de una célula de proteína/ADN, vemos que ésta es ciertamente más compleja que una célula de ARN mínima, y que al mismo tiempo es más accesible y más factible desde un punto de vista experimental, ya que todos los ingredientes existen. Como ya lo mencionamos, las ribozimas autorreplicadoras, aunque son objetos fascinantes, no están disponibles (y es dudoso que alguna vez lo estén), mientras que los genes y las enzimas de una proteína/ADN sí lo están. En particular, la cuestión se reduce a si la construcción de la célula mínima respectiva es posible o no con las actuales herramientas de laboratorio.

Tradicionalmente, los investigadores en el campo de la química prebiótica han utilizado el llamado método de abajo-arriba, basado en la idea de que un aumento continuo y espontáneo de la complejidad molecular tuvo que transformar la materia inanimada para que surgieran los primeros entes celulares autorreproductores. Por diversas razones, esta metodología no ha tenido éxito, y recientemente se ha propuesto otra para la construcción de la célula viviente mínima (indicada en la figura XXI.4). Nosotros utilizamos ácidos nucleicos y enzimas existentes y los insertamos en una vesícula, reconstruyendo así la célula viviente mínima.

Mientras que el término “abajo-arriba” está ya aceptado y reconocido, esta vía alternativa hacia la célula mínima resulta menos clara y podría dar pie a diferentes interpretaciones. El término “arriba-abajo” se ha empleado para indicar la utilización de componentes celulares existentes (ADN y enzimas) para construir modelos celulares sencillos. Sin embargo, este concepto podría malinterpretarse, ya que en cierto sentido también es un método abajo-arriba, puesto que se dirige al incremento de la complejidad (la célula) a partir de componentes elementales (el ADN y las enzimas). Además, puede haber diferentes interpretaciones de los términos “arriba-abajo” y “abajo-arriba” en la literatura, y nosotros creemos que para obviar las confusiones el término “reconstrucción” es acaso más adecuado en las investigaciones sobre la célula mínima, dejando claro que en este procedimiento uno no llega necesariamente a la construcción de una célula existente o de un ente que exista en la Tierra. Es aceptable usar el término “célula artificial”, ya que ésta no existe en nuestro mundo biológico.³⁵ No obstante, puesto que por

³⁵ A. Pohorille y D. Deamer, *op. cit.*

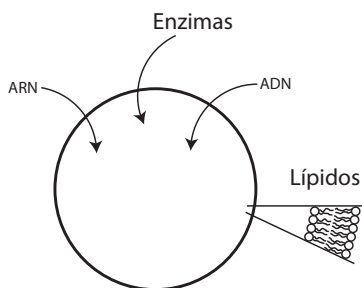


FIGURA XXI.4. *El método semisintético para la construcción de la célula mínima.*

lo general se utiliza para producir enzimas y genes existentes, acaso sería más adecuado el término “célula semiartificial”.

Habiendo aclarado esto, el siguiente paso es preparar el terreno del método experimental. Necesitamos un compartimento de tipo celular, y las vesículas (liposomas cuando se constituyen con lípidos) representan el método preferido. La figura XXI.5 indica que la incorporación de los componentes en las vesículas es la mejor manera de empezar. De hecho, varios intentos muy divulgados se han llevado a cabo en este sentido. En todos éstos, como veremos, supuestamente se tiene que dar una reacción en el interior acuoso de las vesículas, pero inicialmente uno también debe considerar que la superficie de la membrana puede funcionar a su vez como un sitio para la reacción, particularmente si se emplean compuestos hidrofóbicos. Sin embargo, esto es algo que no se ha investigado en detalle todavía.

Este trabajo pretende proporcionar información básica que se limita a los métodos experimentales —opción que implica dejar de lado los muchos modelos teóricos de la vida mínima que suelen proponer los científicos computacionales y los teóricos de la complejidad—.

ETAPAS PRELIMINARES: LA REACTIVIDAD EN LAS VESÍCULAS

Dos áreas de investigación anteceden a la utilización de los liposomas como modelos celulares. La primera estudia las posibles analogías entre las vesículas y las membranas celulares con base en propiedades fisicoquímicas, tales como la estabilidad, la permeabilidad y la autorreproducción, a fin de ver si (y hasta qué punto)

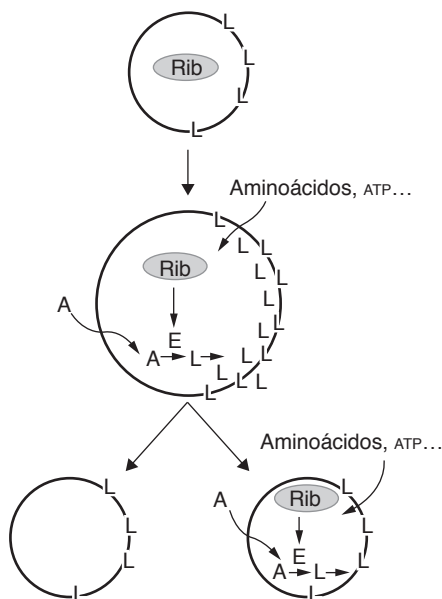


FIGURA XXI.5. Una célula que hace su propia demarcación.

La serie completa de biomacromoléculas necesarias para la realización de la síntesis proteica (genes, polimerasas y ribosomas de ARN) se indica como Rib. El producto de esta síntesis (E) es la serie completa de enzimas para la síntesis lipídica (L). Tras crecer y dividirse, algunas de las “nuevas” vesículas podrían experimentar la “muerte por dilución”.

las vesículas son como las estructuras celulares. La segunda área estudia la utilización de las vesículas como huéspedes para reacciones biológicas moleculares complejas, a fin de saber si las vesículas efectivamente pueden sustentar la bioquímica de la vida celular.

En relación con la primera área de investigación, se ha demostrado que las vesículas son capaces de multiplicarse a expensas de los precursores surfactantes;³⁶ en ciertas condiciones, esto puede ocurrir reteniendo la distribución de la dimensión original (el llamado efecto de matriz; véanse Bloechliger y sus colegas,³⁷

³⁶ P. A. Bachman, P. L. Luisi y J. Lang, “Autocatalytic Self-replicating Micelles as Models for Prebiotic Structures”, *Nature*, 357: 57-59, 1992; P. L. Luisi *et al.*, “A Possible Route to Prebiotic Vesicle Reproduction”, *Artificial Life*, 10: 297-308, 2002; P. Walde *et al.*, “Oparin’s Reactions Revisited: Enzymatic Synthesis of Poly (Adenylic Acid) in Micelles and Self-reproducing Vesicles”, *Journal of the American Chemical Society*, 116: 7451-7544, 1994.

³⁷ E. Bloechliger *et al.*, “Matrix Effect in the Size Distribution of Fatty Acid Vesicles”, *Journal of Physical Chemistry*, 102: 10383-10390, 1998.

Lonchin y sus colegas³⁸ y Rasi y sus colegas).³⁹ No es el propósito de este artículo examinar todos estos datos, aunque es importante tener en cuenta que uno de los mecanismos más críticos de las células vivientes puede simularse mediante vesículas basadas solamente en propiedades químicas y físicas (es decir, sin la utilización de maquinarias bioquímicas complejas). Este punto es importante cuando uno enfoca el escenario prebiótico.

Otra propiedad fisicoquímica preliminar importante es la permeabilidad de la membrana para las sustancias disueltas. Aquí las cosas son más complicadas, ya que las vesículas y los liposomas ofrecen una resistencia considerable a la asimilación de las sustancias bioquímicas simples en su interior acuoso. Esto es particularmente cierto en el caso de las membranas fosfolipídicas, las cuales comúnmente se usan como modelos para las modernas membranas bicapa. Hay que advertir, sin embargo, que los fosfolípidos son compuestos relativamente modernos; es muy probable que las primeras membranas y vesículas estuvieran constituidas por surfactantes, los cuales ofrecían una mayor permeabilidad (aunque posiblemente menos estabilidad) en virtud de su presumible composición química heterogénea. Es razonable, de hecho, que las propiedades y funciones de demarcación de las células primigenias pudieran haber sido de alguna manera más “permisivas”.

Es posible el uso de canales en las membranas, pero hasta ahora su éxito ha sido modesto. Una excepción ha sido la utilización de α -hemolisina por Noireaux y Libchaber.⁴⁰ Este método ha sido bastante exitoso. Sin embargo, uno debe considerar que en términos generales los poros de α -hemolisina no son selectivos y bidireccionales, y por lo tanto se caracterizan por su baja especificidad; no son muy eficientes debido a la disipación del gradiente. Además, la α -hemolisina no puede considerarse como una proteína primigenia, a pesar de la relativa exactitud con que los aspectos de baja selectividad representan una situación donde las primeras protocélulas no específicas se desarrollaron. El problema principal está en cómo se puede reunir la alta concentración local requerida en el interior acuoso de los liposomas. Esta dificultad se podría parcialmente obviar si dos o más liposomas, cada cual con un substrato dado, pudieran fusionarse entre sí para producir liposomas que tuvieran todos los reactivos. De hecho, la fusión de vesículas

³⁸ S. Lonchin *et al.*, “A Matrix Effect in Mixed Phospholipid/Fatty Acid Vesicle Formation”, *Journal of Physical Chemistry B*, 103: 10910-10916, 1999.

³⁹ S. Rasi, F. Mavelli y P. L. Luisi, “Cooperative Micelle Binding and Matrix Effect in Oleate Vesicle Formation”, *Journal of Physical Chemistry B*, 107 (50): 14068-14076, 2003.

⁴⁰ V. Noireaux y A. Libchaber, “A Vesicle Bioreactor as a Step toward an Artificial Cell Assembly”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101 (51): 17669-17674, 2004.

se está convirtiendo en una fecunda área de investigación, y ya se han obtenido resultados interesantes.⁴¹

La fusión de los compartimentos también puede lograrse mediante la utilización de una emulsión de agua-en-aceite. De hecho, con este método, como más adelante veremos detalladamente, la síntesis proteica se podría lograr mediante la combinación de compartimentos que contuvieran varios ingredientes para la síntesis.

Respecto al área de las reacciones bioquímicas en los liposomas, una gran cantidad de trabajo experimental (principalmente las indagaciones en que los liposomas se han utilizado como sistemas huésped para las reacciones moleculares biológicas) ha preparado el terreno para desarrollos significativos (cuadro XXI.5).

Por ejemplo, la biosíntesis de las colas de poli-A (un modelo del ARN) se reportaron independientemente por dos grupos.⁴² En ambos casos, la fosforilasa polinucleótida fue capturada en vesículas, y se pudo observar la síntesis de la poli-A que permaneció en el interior acuoso de estas vesículas. En uno de los casos,⁴³ la síntesis interna de la poli-A se realizó simultáneamente a través de la reproducción de las capas de las vesículas, gracias a la adición externa de un precursor membrano-génico (anhídrido oleico).

Un ejemplo más interesante se proporcionó poco después⁴⁴ con la utilización de la Q β replicasa, una enzima que replica el template de ARN. También en este caso la replicación de un componente medular se acopló con la replicación de la membrana de vesícula. Mediante un exceso de Q β replicasa/template de ARN, la replicación del ARN pudo continuar durante unas cuantas generaciones.

Este sistema, tanto como el anterior de Walde y sus colegas,⁴⁵ es interesante porque representa un caso de “replicación de centro-y-membrana” en que tanto el

⁴¹ V. Marchi-Artzner *et al.*, “Interaction, Lipid Exchange, and Effect of Vesicle Size in Systems of Oppositely Charged Vesicles”, *Journal of Physical Chemistry*, 100: 13844-13856, 1996; D. P. Pantazatos y R. C. MacDonald, “Directly Observed Membrane Fusion between Oppositely Charged Phospholipids Bilayers”, *Journal of Membrane Biology*, 170: 27-38, 1999; L. Stamatatos *et al.*, “Interactions of Cationic Lipid Vesicles with Negatively Charged Phospholipid Vesicles and Biological Membranes”, *Biochemistry*, 27: 3917-3925, 1988; C. F. Thomas y P. L. Luisi, “Novel Properties of DDAB: Matrix Effect and Interaction with Oleate”, *Journal of Physical Chemistry B*, 108: 11285-11290, 2004.

⁴² A. C. Chakrabarti *et al.*, “Production of RNA by Polymerase Protein Encapsulated within Phospholipid Vesicles”, *Journal of Molecular Evolution*, 39 (6): 555-559, 1994; P. Walde *et al.*, “Oparin's Reactions Revisited: Enzymatic Synthesis of Poly (Adenylic Acid) in Micelles and Self-reproducing Vesicles”, *op. cit.*

⁴³ P. Walde *et al.*, “Oparin's Reactions Revisited: Enzymatic Synthesis of Poly (Adenylic Acid) in Micelles and Self-reproducing Vesicles”, *op. cit.*

⁴⁴ T. Oberholzer, M. Albrizio y P. L. Luisi, *op. cit.*

⁴⁵ P. Walde *et al.*, “Oparin's Reactions Revisited: Enzymatic Synthesis of Poly (Adenylic Acid) in Micelles and Self-reproducing Vesicles”, *op. cit.*

CUADRO XXI.5. Reacciones moleculares biológicas en los liposomas

Descripción del sistema	Objetivo principal y resultados	Referencias
Síntesis de la enzima poli-A	La fosforilasa polinucleótida produce poli-A a partir de ADP	Chakrabarti <i>et al.</i> ^a
Síntesis de la enzima poli-A	Se producen simultáneamente en el interior la poli-A y la autorreproducción (no acoplada) de las vesículas	Walde <i>et al.</i> ^b
Vesículas oleosas con la enzima Q β replicasa, un templete de ARN, y ribonucleótidos; se añadió externamente el anhídrido oleico insoluble en agua	Una primera aproximación a una célula sintética mínima: la replicación de un templete de ARN se realizó simultáneamente con la autorreplicación de las vesículas	Oberholzer <i>et al.</i> ^c
Liposomas POPC con todos los reactivos necesarios para realizar una reacción PCR	Amplificación del ADN por el PCR dentro de los liposomas; se produjo una cantidad significativa de ADN	Oberholzer <i>et al.</i> ^d
Los liposomas POPC* incorporan el complejo ribosomal con los demás componentes necesarios para la expresión proteica	Es posible llevar a cabo la síntesis ribosomal de los polipéptidos en los liposomas; la síntesis de poli(Phe) se monitoreó mediante la cuantificación de los marcados como productos 14C.	Oberholzer <i>et al.</i> ^e
El ADN T7 dentro de vesículas gigantes de dimensión celular se formó al inflarse de manera natural las películas fosfolipídicas	Transcripción del ADN y transportación del ADN mediante pinzas de láser; las vesículas se comportaron como barreras, impidiendo el ataque de la RNasa	Tsumoto <i>et al.</i> ^f
Un templete de ADN y la enzima T7 ARN polimerasa se microinyectaron en una vesícula gigante seleccionada; se añadieron externamente nucleósidos trifosfatos	La permeabilidad de las vesículas gigantes aumentó en un campo eléctrico alternante; se obtuvo la síntesis de ARNm	Fischer <i>et al.</i> ^g

* POPC 1-palmitoil-2-oleil fosfatidilcolina

^a A. C. Chakrabarti *et al.*, *op. cit.*

^b P. Walde *et al.*, "Oparin's Reactions Revisited: Enzymatic Synthesis of Poly (Adenylic Acid) in Micelles and Self-reproducing Vesicles", *op. cit.*; P. Walde *et al.*, "Autopoietic Self-reproduction of Fatty Acid Vesicles", *Journal of the American Chemical Society*, 116: 11649-11654, 1994.

^c T. Oberholzer, M. Albrizio y P. L. Luisi, "Polymerase Chain Reaction in Liposomes", *Chemistry and Biology*, 2 (10): 677-682, 1995; T. Oberholzer *et al.*, "Enzymatic RNA Replication in Self-reproducing Vesicles: An Approach to a Minimal Cell", *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 207 (1): 250-257, 1995.

^d *Idem.*

^e T. Oberholzer, K. H. Nierhaus y P. L. Luisi, "Protein Expression in Liposomes", *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 261: 238-241, 1999.

^f K. Tsumoto *et al.*, "Giant Liposome as a Biochemical Reactor: Transcription of DNA and Transportation by Laser Tweezers", *Langmuir*, 17: 7225-7228, 2001.

^g A. Fischer, A. Franco y T. Oberholzer, "Giant Vesicles as Microreactors for Enzymatic mRNA Synthesis", *ChemBioChem*, 3: 409-417, 2002.

interior como la membrana misma experimentan una duplicación. Sin embargo, las limitaciones de esta analogía son claras; de hecho, una reproducción real del centro-y-membrana debe ser sincrónica, lo cual no sucedió.

En particular, aun si el templete de ARN y la membrana de la vesícula se replican, la Q β replicasa no se produce continuamente en el proceso; por lo tanto, el sistema experimenta la “muerte por dilución”. Después de un tiempo, las nuevas vesículas no contienen ni la enzima ni el templete; por lo tanto, el modelo no puede reproducirse completamente.

Otra reacción bioquímica compleja que se ha implementado en los liposomas es la reacción en cadena de la polimerasa (PCR) [*polymerase chain reaction*].⁴⁶ Los liposomas pudieron soportar las duras condiciones de la PCR, con ciclos de temperatura de hasta 90 °C (los liposomas prácticamente no habían sufrido ningún cambio al final de la reacción). Además, nueve sustancias químicas diferentes tuvieron que encapsularse en cada liposoma para que la reacción tuviera lugar. La eficiencia de la encapsulación puede no ser la que se espera estadísticamente, pues depende de la concentración química y del mecanismo de la formación de los liposomas. Particularmente no resulta claro que las nueve sustancias químicas puedan ser simultáneamente entrampadas dentro de un liposoma.

Utilizando poly(U) como ARNm, Oberholzer y sus colegas⁴⁷ produjeron poli(Phe), a partir de la fenilalanina, los ribosomas, el ARNt^{Phe}, y los factores de elongación encapsulados en las vesículas de lecitina. En comparación con el experimento en agua sin liposomas, el rendimiento fue de 5%, pero los autores alegan que en realidad el rendimiento fue sorprendentemente alto, considerando que los liposomas ocupaban sólo una fracción muy pequeña del volumen total y que sólo muy pocos de ellos podrían contener todos los ingredientes mediante la encapsulación estadística.⁴⁸

El cuadro también registra el trabajo de Fischer y sus colegas⁴⁹ en la síntesis de ARNm dentro de vesículas gigantes utilizando una plantilla de ADN y T7 ARN polimerasa, así como la polimerasa utilizada por Tsumoto y sus colegas⁵⁰ en la transcripción del ADN. Monnard⁵¹ hizo observaciones adicionales sobre la actividad de la polimerasa dentro de las vesículas.

⁴⁶ T. Oberholzer, M. Albrizio y P. L. Luisi, *op. cit.*

⁴⁷ T. Oberholzer, K. H. Nierhaus y P. L. Luisi, *op. cit.*

⁴⁸ *Idem.*

⁴⁹ A. Fischer, A. Franco y T. Oberholzer, *op. cit.*

⁵⁰ K. Tsumoto *et al.*, *op. cit.*

⁵¹ P. A. Monnard, “Liposome-Entrapped Polymerases as Models for Microscale/Nanoscale Bio-reactors”, *Journal of Membrane Biology*, 191: 87-97, 2003.

LA EXPRESIÓN PROTEICA EN LOS LIPOSOMAS

En el apartado “Etapas preliminares: la reactividad en las vesículas” vimos la realización y optimización de reacciones bioquímicas bastante complejas en los liposomas. ¿Cómo se podría planificar la construcción de una célula mínima? Teóricamente, deberíamos incrementar la complejidad del interior de los liposomas a fin de aproximarnos al genoma mínimo, como antes lo expusimos.

Este método no se ha utilizado hasta ahora. Los investigadores han intentado insertar las condiciones para la expresión de una sola proteína en los liposomas. Es fácilmente comprensible que se haya elegido como objetivo (sobre todo por ser detectable), la proteína verde fluorescente (GFP).

¿Con cuántos genes? Bueno, la respuesta a esta pregunta tampoco es fácil de extraer a partir de los datos actuales, puesto que generalmente los autores no han realizado un cálculo de los genes/enzimas implicados. Con frecuencia se utilizan equipos comerciales para la expresión proteica, los cuales son cajas negras que no indican el número de enzimas (y ocasionalmente se han utilizado extractos celulares completos de *E. coli*). Por otra parte, es justo decir que sólo se implica una parte mínima del genoma de *E. coli* en la expresión de una proteína sencilla.

En el cuadro XXI.6 presentamos un resumen de los trabajos realizados, que se limita a la expresión de las proteínas en los liposomas.

La estrategia común consiste en atrapar todos los ingredientes para la expresión proteica *in vitro* (es decir, el gen para la GFP [un plásmido], la ARN polimerasa, los ribosomas y todos los componentes de bajo peso molecular [los aminoácidos y el ATP] necesarios para la expresión de la proteína) en el interior acuoso de los liposomas.

Yu y sus colegas,⁵² por ejemplo, han reportado la expresión de una GFP mutante en liposomas de lecitina. Se analizaron, mediante la citometría de flujo y la microscopía láser confocal, vesículas grandes que expresaban GFP y que se habían preparado con el método de hidratación de la película lipídica.

En el procedimiento adoptado por Oberholzer y Luisi,⁵³ se añadieron todos los elementos a una solución donde las vesículas se formaron mediante el método de inyección de etano, evidenciándose entonces dentro de los compartimentos una producción de GFP mejorada (EGFP). En este caso, la muestra fue analizada espectroscópicamente, monitoreando el incremento en la señal fluorescente

⁵² W. Yu *et al.*, *op. cit.*

⁵³ T. Oberholzer y P. L. Luisi, *op. cit.*

CUADRO XXI.6. *La expresión de las proteínas en los compartimentos*

<i>Descripción del sistema</i>	<i>Objetivo principal y resultados</i>	<i>Referencias</i>
Se utilizaron liposomas de huevo-PC, colesterol, y DSPE-PEG5000 para atrapar la síntesis proteica libre de células	Se determinó con citometría de flujo la expresión de GFP mutante	Yu <i>et al.</i> ^a
Preparación de pequeñas liposomas con el método de inyección de etanol	Se evidenció mediante espectrofluorimetría la expresión de EGFP	Oberholzer y Luisi ^b
Sistema de expresión de genes dentro de vesículas lipídicas del tamaño de una célula	Encapsulación de un sistema de expresión de genes; alto rendimiento de GFP en el interior de las vesículas gigantes	Nomura <i>et al.</i> ^c
Sistema de compartimentos de agua-en-aceite, con burbujas de agua hasta de 50 µm	Expresión de GFP combinando diferentes compartimentos capaces de fusionarse entre sí	Pietrini y Luisi ^d
Encapsulación en los liposomas de una red genética de dos etapas	Red genética en que el producto proteico de la primera etapa (T7 ARN polimerasa) se requiere para impulsar la síntesis proteica de la segunda etapa (GFP)	Ishikawa <i>et al.</i> ^e
Encapsulación de un sistema de expresión de <i>E. coli</i> a-celular en una vesícula fosfolipídica que se transfirió a una solución nutriente que contenía ribonucleótidos y aminoácidos	La expresión de la α-hemolisina dentro de la vesícula solucionó las limitaciones materiales y energéticas; el reactor pudo sustentar la expresión durante cuatro días	Noireaux y Libchaber ^f

^a W. Yu *et al.*, "Synthesis of Functional Protein in Liposome", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92 (6): 590-593, 2001.

^b T. Oberholzer y P. L. Luisi, "The Use of Liposomes for Constructing Cell Models", *Journal of Biological Physics*, 28: 733-744, 2002.

^c S. M. Nomura *et al.*, "Gene Expression within Cell-Sized Lipid Vesicles", *ChemBioChem*, 4: 1172-1175, 2003.

^d A. V. Pietrini y P. L. Luisi, "Cell-Free Protein Synthesis through Solubilisate Exchange in Water/Oil Emulsion Compartments", *ChemBioChem*, 5: 1055-1062, 2004.

^e K. Ishikawa *et al.*, "Expression of a Cascading Genetic Network within Liposomes", *FEBS Letters*, 576: 387-390, 2004.

^f V. Noireaux y A. Libchaber, *op. cit.*

de EGFP. La desventaja de este procedimiento es que la eficiencia de la encapsulación es generalmente baja, a causa del pequeño volumen interno de los liposomas que con este sistema se obtiene. Por otra parte, el examen de la producción de EGFP dentro del interior acuoso de los liposomas confirma que se obtuvo la encapsulación de varios solutos diferentes.

Utilizando vesículas gigantes se pudo observar directamente la expresión proteica con el procedimiento de Nomura y sus colegas.⁵⁴ La progresión de la reacción se observa mediante la microscopía de escaneo láser, demostrándose que la expresión de GFP con fluorescencia roja (GFPRs) [red-shifted GFP] tiene lugar con muy alta eficiencia (la concentración de GFPRs en las primeras horas fue mayor dentro de las vesículas que en el entorno externo). Los autores también demuestran que las vesículas pueden proteger los productos génicos de la proteínasa K externa.

Más recientemente, sobre la base del informe inicial de la expresión de proteína funcional en liposomas,⁵⁵ Ishikawa y sus colegas⁵⁶ pudieron diseñar y producir experimentalmente una expresión proteica en cascada de dos niveles. Se construyó y atrapó en liposomas un plásmido que contenía la polimerasa T7 ARN (con un promotor SP6) y una GFP mutante (con un promotor T7), junto con una mezcla de expresión proteica *in vitro* (de la enzima SP6 ARN polimerasa). En estas condiciones, la polimerasa SP6 ARN impulsa la producción de la polimerasa T7 ARN, la cual a su vez induce la expresión de GFP detectable.

Es de particular interés el trabajo de Noireaux y Libchaber.⁵⁷ Nuevamente se utilizó un plásmido que codificaba para dos proteínas; específicamente, los autores introdujeron EGFP y genes de α -hemolisina. A diferencia de la red en cascada antes descrita, ahora la segunda proteína (α -hemolisina) no tiene una función directa en la expresión proteica, pero participa en una tarea distinta. De hecho, aunque la α -hemolisina es una proteína soluble en agua, es capaz de autoensamblarse como un heptámero en la bicapa, generando un poro que tiene un diámetro de 1.4 nm (límite $\sim$ kDa). De esta forma fue posible nutrir el interior acuoso de las vesículas, realizando un biorreactor de larga vida, en el cual la expresión de la EGFP registrada se prolongó hasta cuatro días. Este trabajo ciertamente representa un hito en la vía a la célula mínima, porque el poro de la α -hemolisina permitió el ingreso de pequeños metabolitos desde el medio externo y por lo tanto solucionó las limitaciones energéticas y materiales típicas de los liposomas impermeables.

Finalmente, la GFP también se ha expresado en un tipo de compartimento distinto al de las vesículas; cavidades acuosas (hábitats acuosos de dimensión micrométrica) de emulsiones de agua-en-aceite, donde se ha observado⁵⁸ que se

⁵⁴ S. M. Nomura *et al.*, *op. cit.*

⁵⁵ W. Yu *et al.*, *op. cit.*

⁵⁶ K. Ishikawa *et al.*, *op. cit.*

⁵⁷ V. Noireaux y A. Libchaber, *op. cit.*

⁵⁸ A. V. Pietrini y P. L. Luisi, *op. cit.*

puede expresar una proteína funcional que representa una fracción de volumen diminuta (~0.5%) de una muestra de hidrocarburo.

Además, el grado de complejidad buscado, entendido como la reunión de todos los componentes necesarios para la expresión de GFP, se obtuvo mediante el intercambio de solubilizantes y/o fusión entre los diferentes compartimentos acuosos, cada uno portador de una parte de la maquinaria bioquímica (plásmido, ARN polimerasas, ribosomas y extractos celulares, y aminoácidos).

En resumen, en los últimos años se llevaron a cabo unas cuantas investigaciones pioneras sobre la expresión proteica dentro de los liposomas, y algunas de éstas mostraron el efecto de la “compartimentación” (es decir, una mayor producción de expresión proteica en las vesículas que en el búfer), fenómeno muy interesante que merece investigarse más.

Asimismo, vale la pena mencionar que hasta la fecha sólo se han expresado proteínas solubles en agua y no se ha investigado la expresión de las proteínas solubles en las membranas.

También es importante mencionar algunos trabajos interesantes que a pesar de que no se relacionan directamente con la cuestión de la célula mínima, estudian la microtubulación. Un equipo en el Instituto Curie⁵⁹ ha estudiado la combinación de vesículas gigantes, microcuentas y motores moleculares. Los autores han demostrado que las vesículas lípidas unilamelares gigantes, a las que se pegan moléculas de kinesina, producen tubos en las membranas, así como complejas redes tubulares, formando un sistema original que emula el transporte intracelular. La formación de tubos en las membranas de las vesículas gigantes mediante la asociación dinámica de las proteínas motoras también ha sido estudiada por Koster y sus colegas,⁶⁰ mientras que Glade y sus colegas⁶¹ han demostrado el transporte y organización colectiva de las vesículas fosfolípicas y otras partículas a través de túbulos.

Este tipo de trabajos prepara el terreno para la investigación del transporte y la organización intracelular en un nivel de complejidad mayor dentro de las células semiartificiales.

⁵⁹ A. Roux *et al.*, “A Minimal System Allowing Tubulation with Molecular Motors Pulling on Giant Liposomes”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99: 5394-5399, 2002.

⁶⁰ G. Koster *et al.*, “Membrane Tube Formation from Giant Vesicles by Dynamic Association of Motor Proteins”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100: 15583-15588, 2003.

⁶¹ N. Glade, J. Demongeot y J. Tabony, *op. cit.*

¿QUÉ SIGUE?

Sobre la base de la noción de la célula mínima, el análisis de los datos expuestos en este artículo revela lo que aún queda por hacer antes de que podamos seguir avanzando en este campo.

Por ejemplo, la expresión proteica, tal como se resume en los más sobresalientes experimentos que aparecen en el cuadro XXI.6, se ha llevado a cabo sin determinar el número de enzimas/genes utilizados. Nosotros creemos que sería mejor que se llevara a cabo la expresión proteica mediante la utilización de concentraciones conocidas de enzimas/genes individuales (y dejando de lado los equipos comerciales) para saber exactamente lo que hay “en la olla” y posiblemente para intervenir en los correspondientes procesos químicos. Esta operación se correspondería con la implementación del genoma mínimo dentro de los liposomas y podría preparar el terreno para los siguientes pasos.

Las discusiones anteriores y los datos registrados en el cuadro XXI.6 patentizan otro elemento esencial que aún se necesita antes de que podamos alcanzar el caso ideal que aparece en la figura XXI.1: la autorreproducción. De hecho, tras haber producido GFP, se ha observado que ninguno de los sistemas del cuadro XXI.6 se ha podido autorreproducir y dar origen a una cadena de sistemas de producción de GFP.

En los verdaderos sistemas biológicos, una célula es capaz de duplicarse y autorreproducirse con el mismo contenido genético. Esto se debe a sistemas de regulación, y este aspecto aún no se ha considerado en la planificación experimental de las células mínimas. En este contexto, aparte de relacionarse con la división celular procariota, la investigación antes citada sobre los microtúbulos podría representar una interesante perspectiva sobre este problema.

Algo muy interesante sería lograr la autorreproducción de las vesículas lipídicas mediante la síntesis endógena. En principio, es posible implementar dos estrategias: 1) incorporando primero las enzimas que sintetizan los lípidos, o 2) empezando con los genes correspondientes (es decir, expresando esas enzimas dentro de las vesículas).

Los primeros intentos han enfocado la producción enzimática de lecitina en los liposomas de la lecitina.⁶² La vía metabólica es la llamada vía de rescate, que

⁶² P. K. Schmidli, P. Schurtenberger y P. L. Luisi, “Liposome-Mediated Enzymatic Synthesis of Phosphatidylcholine as an Approach to Self-replicating Liposomes”, *Journal of the American Chemical Society*, 113: 8127-8130, 1991.

convierte el glicerol-3-fosfato en ácido fosfatídico, en diacilglicerol, y finalmente en fosfatidilcolina. Las cuatro enzimas necesarias para realizar estas reacciones se insertaron simultáneamente en los liposomas con el método de eliminación del detergente, y a la síntesis de la nueva fosfatidilcolina (rendimiento de 10%) siguió el etiquetamiento radiactivo. La transformación de los liposomas, seguida por la dispersión dinámica de la luz, demostró que las vesículas cambian la distribución de su tamaño en el proceso.

Éste fue realmente un sistema complejo, y posteriormente se entendió que era posible, teóricamente, no ir más allá de la síntesis del ácido fosfatídico, ya que este compuesto también formaba liposomas estables. Las investigaciones posteriores⁶³ se dirigieron a caracterizar el proceso mediante la sobreexpresión en *E. coli* y la reconstitución en los liposomas de las primeras dos enzimas de la vía de rescate fosfolipídica a fin de obtener vesículas autorreproductoras con dos enzimas solamente.

La producción (descrita en la figura XXI.5) de la membrana celular desde el interior se corresponde con la noción de la autopoiesis.⁶⁴

Sería un gran avance la síntesis interna de la lecitina en los liposomas de la lecitina. En particular, será muy interesante determinar, dado un cierto exceso de ambas enzimas, durante cuántas generaciones podría continuar la autorreproducción celular. Sin embargo, es claro que el sistema experimentaría la “muerte por dilución” tras algunas generaciones.

Finalmente, en el camino a la verdadera célula mínima está el problema de una reducción mayor de los genes. En todos los sistemas que aparecen en el cuadro XXI.6 se emplea la biosíntesis proteica ribosomal, lo cual implica de 100 a 200 genes. Aún estamos lejos de nuestra visión ideal de una célula mínima, y debemos considerar, una vez más, la cuestión de cómo planear los experimentos a fin reducir esta complejidad.

Debemos recurrir a experimentos de reducción (por ejemplo, los que se esbozan en los trabajos de Islas y sus colegas⁶⁵ y de Luisi y sus colegas),⁶⁶ una simplificación que también se corresponde con el acercamiento a las células primigenias.

⁶³ P. Luci, *Gene Cloning Expression and Purification of Membrane Proteins*, ETH-Z Dissertation No. 15108, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zúrich, 2003.

⁶⁴ P. L. Luisi, “Autopoiesis: A Review and a Reappraisal”, *Naturwissenschaften*, 90: 49-59, 2003; P. L. Luisi y F. J. Varela, “Self-replicating Micelles — A Chemical Version of Minimal Autopoietic Systems”, *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, 19: 633-643, 1990; F. Varela, H. R. Maturana y R. B. Uribe, “Autopoiesis: The Organization of Living System, its Characterization and a Model”, *Biosystems*, 5: 187-196, 1974.

⁶⁵ S. Islas *et al.*, *op. cit.*

⁶⁶ P. L. Luisi, “Toward the Engineering of Minimal Living Cells”, *op. cit.*

Es necesaria la simplificación de la maquinaria ribosomal y de la batería enzimática dedicada a la síntesis de ARN y ADN.⁶⁷

¿Es esto factible empíricamente? Por ejemplo, ¿es posible desarrollar *in vitro* formas sencillas de sustentación rígida de las reacciones (en particular la biosíntesis proteica) que funcionen como ribosomas? Pensemos primero en el ARN ribosomal a-proteico. ¿Podría uno utilizar solamente, a expensas de la especificidad, unas cuantas polimerasas? Similarmente, acaso no fuera necesario, al principio, utilizar todos los posibles tipos específicos de ARNt, sino tan sólo unos cuantos, no específicos. Uno podría incluso concebir experimentos con un número limitado de aminoácidos. Ahora bien, todo esto tiene que ponerse a prueba experimentalmente; no hay otro modo de hacerlo.

COMENTARIOS FINALES

La definición de una célula mínima, tal como se dio en el inicio de este resumen, parece sencilla y posee una cierta elegancia. En cambio, las implementaciones experimentales de las células mínimas pueden no parecer tan satisfactorias y elegantes. Nosotros hemos resumido las dificultades principales que posiblemente se encuentren en el proceso de la construcción de una célula mínima ideal, y hemos señalado, por ejemplo, que en la mejor de las hipótesis, la muerte por dilución representa una limitación; la autorreproducción es una meta que todavía no se ha logrado.

Un problema con la actual bibliografía sobre las células mínimas es que resulta muy débil el vínculo entre el “genoma mínimo” y la célula mínima; en otras palabras, entre ambos no existe una correlación directa. Sería aconsejable que los investigadores en este campo “contaran” los genes que son activos en las condiciones dadas y compararan la cifra obtenida con la cifra relacionada con el genoma mínimo. Incluso con estas limitaciones, los intentos experimentales por construir una célula mínima tienen gran valor en —pero no se limitan a— la eva-

⁶⁷ Uno de los árbitros, cuyos agudos comentarios agradecemos particularmente, sugirió que sería realmente útil definir “una jerarquía de ‘células mínimas’”. Algunos de los miembros de esta jerarquía podrían requerir amplios recursos del medio ambiente, tales como los compuestos de alta energía. Otros podrían sobrevivir en un medio ambiente de recursos con un bajo contenido de nutrientes, presumiblemente más compatibles con la ‘sopa primigenia’. De hecho, sería muy interesante analizar las diferencias entre los distintos miembros; serían muy reveladoras en relación con la naturaleza de la vida”. Esta propuesta efectivamente podría ser la base de los futuros desarrollos de este tipo de investigaciones sobre la célula mínima, particularmente cuando existan los datos experimentales respecto a estas diferentes clases de protocélulas artificiales.

luación de la simplificación específica del genoma mínimo. La utilización de los liposomas como un “vaso de reacciones” sofisticado es ciertamente útil en la realización técnica de la célula mínima, pero también tiene el valor adicional de representar una posible aproximación al origen de las células biológicas primigenias, con un énfasis en las múltiples consecuencias de la compartimentación.

Los modelos producidos en el laboratorio siguen siendo aproximaciones deficientes a una auténtica célula biológica. Esta distancia que nos separa de las células biológicamente activas de hecho hace prematuro el planteamiento de los posibles peligros y los problemas bioéticos en el campo de las células mínimas.

Pero todavía hay una cuestión muy importante que no se ha discutido debidamente por los autores que investigan la célula mínima: la interacción con el medio ambiente. Claro, la nutrición de la célula mínima en cierto modo se toma en consideración, pero solamente en cuanto reserva de nutrientes y energía. Nosotros creemos que la próxima generación de estudios sobre la célula mínima deberá tomar en cuenta más activamente la incorporación de tales interacciones con el entorno, preguntándose, en particular, en qué condiciones ambientales la célula mínima podrá realizar sus tres funciones básicas.

Sin embargo, estas formas de vida “cojas”, en nuestra opinión representan una parte muy interesante de estas investigaciones en curso. De hecho, estas aproximaciones al fenómeno de la vida son las siguientes: una célula que produce proteínas y que no se reproduce; o una que sí se reproduce durante unas cuantas generaciones y luego muere por dilución; o una célula que sólo reproduce ciertas partes de sí misma; y/o una que se caracteriza por su muy pobre especificidad y metabolismo.

Todos estos modelos son importantes porque, con toda probabilidad, ciertos ensayos similares constituyeron construcciones intermedias que la naturaleza puso a prueba a fin de llegar a la meta final: una cabal célula biológica. Por lo tanto, la creación de estas parcialmente vivientes células mínimas en el laboratorio, así como de la vía evolutiva histórica mediante la cual esta meta posiblemente se alcanzó, podrían ser de fundamental importancia en la comprensión de la verdadera esencia de la vida celular. Además, la construcción de células vivientes semi-sintéticas en el laboratorio sería una demostración (si aún fuera necesaria) de que la vida es en efecto una propiedad emergente. De hecho, en este caso, la vida celular se habría creado a partir de la no vida, ya que los genes individuales y/o las enzimas individuales no son, *per se*, vivientes.

En términos generales, aunque la célula mínima mucho nos puede enseñar sobre la vida celular primitiva y la evolución primigenia, acaso no arroje luz so-

bre el origen de la vida. Ya expusimos las razones de esto, las cuales yacen sobre todo en el hecho de que en nuestra aproximación a la célula mínima, nosotros empezamos con enzimas y genes existentes, en los cuales la expresión cabal de la vida ya existe.

Todo esto representa un gran desafío y es acaso por lo mismo que, como ya dijimos, se ha incrementado marcadamente el interés en la célula mínima. Una razón adicional para este creciente interés se deriva de un difuso sentimiento de confianza en que la célula mínima es realmente una meta que es posible alcanzar empíricamente.

BIBLIOGRAFÍA

- Bachman, P. A., P. L. Luisi y J. Lang, "Autocatalytic Self-replicating Micelles as Models for Prebiotic Structures", *Nature*, 357: 57-59, 1992.
- Berclaz, N., M. Müller, P. Walde y P. L. Luisi, "Growth and Transformation of Vesicles Studied by Ferritin Labeling and Cryotransformation Electron Microscopy", *Journal of Physical Chemistry B*, 105 (5): 1056-1064, 2000.
- Bloechliger, E., M. Blocher, P. Walde y P. L. Luisi, "Matrix Effect in the Size Distribution of Fatty Acid Vesicles", *Journal of Physical Chemistry*, 102: 10383-10390, 1998.
- Calderone, C. T., y D. R. Liu, "Nuclei-Acid-Templated Synthesis as a Model System for Ancient Translation", *Current Opinion in Chemical Biology*, 8: 645-653, 2004.
- Cello, J., A. V. Paul y E. Wimmer, "Chemical Synthesis of Poliovirus cDNA: Generation of Infectious Virus in the Absence Approach", *Science*, 297 (5583): 1016-1018, 2002.
- Chakrabarti, A. C., R. R. Breaker, G. F. Joyce y D. W. Deamer, "Production of RNA by Polymerase Protein Encapsulated within Phospholipid Vesicles", *Journal of Molecular Evolution*, 39 (6): 555-559, 1994.
- Dyson, F. J., "A Model for the Origin of Life", *Journal of Molecular Evolution*, 18: 344-350, 1982.
- Fischer, A., A. Franco y T. Oberholzer, "Giant Vesicles as Microreactors for Enzymatic mRNA Synthesis", *ChemBioChem*, 3: 409-417, 2002.
- Fraser, C. M., J. D. Gocayne, O. White, M. D. Adams, R. A. Cyayton, R. D. Fleischmann, C. J. Bult, A. R. Kerlavage, G. Sutton, J. M. Kelley, R. D. Fritchman, J. F. Weidman, K. V. Small, M. Sandusky, J. Fuhrmann, D. Nguyen, T. R. Utterback, D. M. Saudek, C. A. Philips, J. M. Merrik, J. F. Tomb, B. A. Dougherty, K. F. Bott, P. C. Hu, T. S. Lucier, S. N. Peterson, H. O. Smith, C. A. Hutchison y J. C. Venter, "The Minimal Gene Complement of Mycoplasma Genitalium", *Science*, 270 (5235): 397-403, 1995.

- Frick, D. N., y C. C. Richardson, "DNA Primases", *Annual Review of Biochemistry*, 70: 39-80, 2001.
- Gavriola, L. P., *et al.*, "Factor-Free (Non-enzymic) and Factor-Dependent Systems of Translation of Polyuridylic Acid by *Escherichia coli* Ribosomes", *Journal of Molecular Biology*, 101: 537-552, 1976.
- Gil, R., B. Sabater-Muñoz, A. Latorre, F. J. Silva y A. Moya, "Extreme Genome Reduction in *Buchera* spp.: Toward the Minimal Genome Needed for Symbiotic Life", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99 (7): 4454-4458, 2002.
- Gil, R., F. J. Silva, J. Peretó y A. Moya, "Determination of the Core of a Minimal Bacteria Set", *Microbiology and Molecular Biology Review*, 68: 518-537, 2004.
- Glade, N., J. Demongeot y J. Tabony, "Microtubule Self-Organization by Reaction-Diffusion Processes Cause Collective Transport and Organization of Cellular Particles", *BMC Cell Biology*, 5: 23, 2004.
- Hutchison, C. A., S. N. Peterson, S. R. Gill, R. T. Cline, O. White, C. M. Fraser, H. O. Smith y J. C. Venter, "Global Transposon Mutagenesis and a Minimal Mycoplasma Genome", *Science*, 268 (5447): 2165-2169, 1999.
- Ishikawa, K., K. Sato, Y. Shima, I. Urabe y T. Yomo, "Expression of a Cascading Genetic Network within Liposomes", *FEBS Letters*, 576: 387-390, 2004.
- Islas, S., A. Becerra, P. L. Luisi y A. Lazcano, "Comparative Genomics and the Gene Complement of a Minimal Cell", *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, 34: 243-256, 2004.
- Itaya, M., "An Estimation of the Minimal Genome Size Required for Life", *FEBS Letters*, 362 (39): 257-260, 1995.
- Jay, D. G., y W. Gilbert, "Basic Protein Enhances the Encapsulation of DNA into Lipid Vesicles: Model for the Formation of Primordial Cells", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 84 (7): 1978-1980, 1987.
- Kolisnychenko, V., G. Plunkett, C. D. Herring, T. Fehér, J. Pósfai, F. R. Blattner y G. Pósfai, "Engineering a Reduced *Escherichia coli* Genome", *Genome Research*, 12 (4): 640-647, 2002.
- Koonin, E. V., "Comparative Genomics, Minimal Gen-Sets and the Last Universal Common Ancestor", *National Review of Microbiology*, 1: 127-136, 2003.
- , "How Many Genes Can Build a Cell: The Minimal-Gene-Set Concept", *Annual Review of Genomics and Human Genetics*, 1: 99-116, 2000.
- Koster, G., M. van Duijin, B. Hofs y M. Dogterom, "Membrane Tube Formation from Giant Vesicles by Dynamic Association of Motor Proteins", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100: 15583-15588, 2003.
- Lazcano, A., R. Guerriero, L. Margulius y J. Oró, "The Evolutionary Transcription from RNA to ADN in Early Cells", *Journal of Molecular Evolution*, 27: 283-290, 1988.

- Lazcano, A., V. Valverde, G. Hernández, P. Ariglio, G. E. Fox y J. Oró, "On the Early Emergence of Reverse Transcription: Theoretical Basis and Experimental Evidence", *Journal of Molecular Evolution*, 35: 534-536, 1992.
- Lonchin, S., P. L. Luisi, P. Walde y B. H. Robinson, "A Matrix Effect in Mixed Phospholipid/Fatty Acid Vesicle Formation", *Journal of Physical Chemistry B*, 103: 10910-10916, 1999.
- Luci, P., *Gene Cloning Expression and Purification of Membrane Proteins*, ETH-Z Dissertation No. 15108, Swiss Federal Institute of Technology (ETH), Zürich, 2003.
- Luisi, P. L., "Autopoiesis: A Review and a Reappraisal", *Naturwissenschaften*, 90: 49-59, 2003.
- , "Toward the Engineering of Minimal Living Cells", *Anatomical Record*, 268: 208-214, 2002.
- Luisi, P. L., T. Oberholzer y A. Lazcano, "The Notion of a DNA Minimal Cell: A General Discourse and Some Guidelines for an Experimental Approach", *Helvetica Chimica Acta*, 85: 1759-1777, 2002.
- Luisi, P. L., P. Stano, S. Rasi y F. Mavelli, "A Possible Route to Prebiotic Vesicle Reproduction", *Artificial Life*, 10: 297-308, 2002.
- Luisi, P. L., y F. J. Varela, "Self-replicating Micelles — A Chemical Version of Minimal Autopoietic Systems", *Origin of Life and Evolution of the Biosphere*, 19: 633-643, 1990.
- Marchi-Artzner, V., L. Julien, L. Belloni, D. Raison, L. Lacombe y J. M. Lehn, "Interaction, Lipid Exchange, and Effect of Vesicle Size in Systems of Oppositely Charged Vesicles", *Journal of Physical Chemistry*, 100: 13844-13856, 1996.
- Monnard, P. A., "Liposome-Entrapped Polymerases as Models for Microscale/ Nanoscale Bioreactors", *Journal of Membrane Biology*, 191: 87-97, 2003.
- Morowitz, H. J., "Biological Self-replicating Systems", en F. M. Snell (comp.), *Progress in Theoretical Biology*, vol. I, Academic Press, Nueva York, 1967, pp. 35-38.
- Mushegian, A., "The Minimal Genome Concept", *Current Opinion in Genetics and Development*, 9 (6): 709-714, 1999.
- Mushegian, A., y E. V. Koonin, "A Minimal Gene Set for Cellular Life Derived by Comparison of Complete Bacterial Genomes", *Proceedings of the National Academy of Sciences of United States of America*, 93 (19): 10268-10273, 1996.
- Nissen, P., J. Hansen, N. Ban, P. B. Moore y T. A. Steitz, "The Structural Basis of Ribosome Activity in Peptide Bond Synthesis", *Science*, 289 (5481): 920-930, 2000.
- Noireaux, V., R. Bar-Ziv y A. Libchaber, "Principles of Cell-Free Genetic Circuit Assembly", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100: 12672-12677, 2003.
- Noireaux, V., y A. Libchaber, "A Vesicle Bioreactor as a Step toward an Artificial Cell Assembly", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101 (51): 17669-17674, 2004.

- Nomura, S. M., K. Tsumoto, T. Hamada, K. Akiyoshi, Y. Nakatani y K. Yoshikawa, "Gene Expression within Cell-Sized Lipid Vesicles", *ChemBioChem*, 4: 1172-1175, 2003.
- Oberholzer, T., M. Abrizio y P. L. Luisi, "Polymerase Chain Reaction in Liposomes", *Chemistry and Biology*, 2 (10): 677-682, 1995.
- Oberholzer, T., y P. L. Luisi, "The Use of Liposomes for Constructing Cell Models", *Journal of Biological Physics*, 28: 733-744, 2002.
- Oberholzer, T., K. H. Nierhaus y P. L. Luisi, "Protein Expression in Liposomes", *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 261: 238-241, 1999.
- Oberholzer, T., R. Wick, P. L. Luisi y C. K. Biebricher, "Enzymatic RNA Replication in Self-reproducing Vesicles: An Approach to a Minimal Cell", *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 207 (1): 250-257.
- Ono, N., y T. Ikegami, "Self-maintenance and Self-reproduction in an Abstract Cell Model", *Journal of Theoretical Biology*, 206: 243-253, 2000.
- Pantazatos, D. P., y R. C. McDonald, "Directly Observed Membrane Fusion between Oppositely Charged Phospholipids Bilayers", *Journal of Membrane Biology*, 170: 27-38, 1999.
- Paul, N., y G. F. Joyce, "A Self-replicating Ligase Ribosyme", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99: 12733-12740, 2002.
- Pietrini, A. V., y P. L. Luisi, "Cell-Free Protein Synthesis through Solubilisate Exchange in Water/Oil Emulsion Compartiments", *ChemBioChem*, 5: 1055-1062, 2004.
- Pohorille, A., y D. Deamer, "Artificial Cells: Prospects for Biotechnology", *Trends in Biotechnology*, 20: 123-128, 2002.
- Rasi, S., F. Mayelli y P. L. Luisi, "Cooperative Micelle Binding and Matrix Effect in Oleate Vesicle Formation", *Journal of Physical Chemistry B*, 107 (50): 14068-14076, 2003.
- Roux, A., G. Cappello, J. Cartaud, J. Prost, B. Goud y P. Basserau, "A Minimal System Allowing Tubulation with Molecular Motors Pulling on Giant Liposomes", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99: 5394-5399, 2002.
- Sankararaman, S., G. I. Menon y P. B. Kumar, "Self-organized Pattern Formation in Motor-Microtubule Mixtures", *Physical Review E: Statistical, Nonlinear and Soft Matter Physics*, 70: 031905. doi 10.1103/PhysRevE.031905, 2004.
- Schmidli, P. K., P. Schurtenberg y P. L. Luisi, "Liposome-Mediated Enzymatic Synthesis of Phosphatidylcholine as an Approach to Self-replicating Liposomes", *Journal of the American Chemical Society*, 113: 8127-8130, 1991.
- Shimkets, L. J., "Structure and Sizes of Genomes of the Archaea and Bacteria" en F. J. de Bruin, J. R. Lupskin y G. M. Weinstock (comps.), *Bacterial Genomes: Physical Structure and Analysis*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 1998, pp. 5-11.
- Spirin, A., *Ribosome Structure and Protein Synthesis*, Benjamin Cummings, Menlo Park, California, 1986.

- Stamatatos, L., R. Leventis, M. J. Zuckermann y J. R. Silvius, "Interactions of Cationic Lipid Vesicles with Negatively Charged Phospholipid Vesicles and Biological Membranes", *Biochemistry*, 27: 3917-3925, 1988.
- Sutte, D. P., y J. M. Ravel, "The Effects of Initiation Factor 3 on the Formation of 30S Initiation Complexes with Synthetic and Natural Messengers", *Biochemical and Biophysical Research Communications*, 57 (2): 386-393, 1974.
- Szathmáry, E., "Life: In Search of the Simplest Cell", *Nature*, 433: 469-470, 2005.
- Szostak, J. W., D. P. Bartel y P. L. Luisi, "Synthesizing Life", *Nature*, 409: 387-390, 2001.
- Thomas, C. F., y P. L. Luisi, "Novel Properties of DDAB: Matrix Effect and Interaction with Oleate", *Journal of Physical Chemistry B*, 108: 11285-11290, 2004.
- Tsumoto, K., S. M. Nomura, Y. Nakatani y K. Yoshikawa, "Giant Liposome as a Biochemical Reactor: Transcription of DNA and Transportation by Laser Tweezers", *Langmuir*, 17: 7225-7228, 2001.
- Varela, F., H. R. Maturama y R. B. Uribe, "Autopoiesis: The Organization of Living System, its Characterization and a Model", *Biosystems*, 5: 187-196, 1974.
- Walde, P., A. Goto, P. A. Monnard, M. Wessiken y P. L. Luisi, "Oparin's Reactions Revisited: Enzymatic Synthesis of Poly (Adenylic Acid) in Micelles and Self-reproducing Vesicles", *Journal of the American Chemical Society*, 116: 7451-7544, 1994.
- Walde, P., R. Wick, M. Fresta, A. Mangone y P. L. Luisi, "Autopoietic Self-reproduction of Fatty Acid Vesicles", *Journal of the American Chemical Society*, 116: 11649-11654, 1994.
- Weiner, A. M., y N. Maizels, "tRNA-like Structures Tag the 3 Ends of Genomic RNA Molecules for Replication: Implications for the Origin of Protein Synthesis", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 84: 7383-7387, 1987.
- Woese, C. R., "The Primary Lines of Descent and the Universal Ancestor", en D. S. Bendall (comp.), *Evolution from Molecules to Men*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983, pp. 209-233.
- Yu, W., K. Sato, M. Wakabayashi, T. Nakaishi, E. P. Ko-Mimamura, Y. Shima, I. Urabe y T. Yomo, "Synthesis of Functional Protein in Liposome", *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 92 (6): 590-593, 2001.
- Zhang, B., y T. R. Cech, "Peptidyl-Transferase Ribozymes: Transreactions, Structural Characterization and Ribosomal RNA-like Features", *Chemical Biology*, 5: 539-553, 1998.
- Zimmer, C., "Tinker, Tailor: Can Venter Stich Together a Genome from Scratch?", *Science*, 299: 1006-1007, 2003.

Evelyn Fox Keller

XXII. LA CREACIÓN DE “VIDA AUTÉNTICA”*

EN SU encarnación moderna la utilización del término vida artificial al principio se limitó al mundo de las simulaciones computacionales. Pero cuando Langton expresó su deseo de construir modelos de la vida tan parecidos a ésta que representarían ejemplos de formas de vida auténticas, él deliberadamente —y provocativamente— dejó abierta la posibilidad de construirlos con otro material (no virtual). De hecho, la ambición de descubrir la “esencia de la vida” desde el principio estuvo vinculada —tanto para Langton como para sus precursores al inicio del pasado siglo— con la visión de trascender el abismo entre la vida y la no vida. La esperanza consistía en crear la vida artificial no sólo en el ciberespacio, sino en el mundo real. La contribución de Rodney Brooks al “World Question Center” ubicado en la red explicita este vínculo: “¿cuál es la esencia matemática que distingue lo viviente de lo no viviente?”, pregunta Brooks. “¿Cómo podemos trascender materialmente la frontera?”¹ No es sorprendente, por lo tanto, que la vida artificial se convirtiera rápidamente en el término operativo relacionado indiscriminadamente tanto con los organismos digitales como con los robots físicamente corpóreos que habitan el mismo mundo de cuatro dimensiones en que viven los organismos biológicos.

En un libro reciente titulado *Creation: Life and How to Make It* [La creación: la vida y cómo hacerla], Steve Grand dice:

En la investigación de la vida artificial se inspira una nueva disciplina de la ingeniería cuya meta es revitalizar la tecnología. Utilizando la vida artificial como una manera de acercarnos a la inteligencia artificial, estamos empezando a darles un alma a las máquinas que anteriormente se veían como entes inanimados [...] La tercera gran

* Este texto apareció originalmente como parte del capítulo 9 del libro de E. F. Keller, *Making Sense of Life: Explaining Biological Development with Models, Metaphors, and Machines*, Harvard University Press, Cambridge, 2002, pp. 285-294.

¹ R. Brooks, *World Question Center*, Edge Foundation, 1997. Disponible en <<http://www.edge.org/documents/archive/edge31.html>> (registrado en agosto de 2008).

edad de la tecnología está a punto de empezar. Es la Edad de la Biología, en la cual las máquinas y los organismos *sintéticos* se fusionan.²

Aquí la palabra “sintéticos” revela otra ambigüedad más, refiriéndose simultáneamente a las estructuras artificiales creadas en el “mundo-espejo” del ciberespacio, y a las estructuras artificiales que construyen los ingenieros “utilizando objetos [materiales] o combinándolos para hacer nuevas estructuras”.³ Sin embargo, a pesar del realismo con que los organismos digitales puedan representarse en la pantalla, y de la gran seducción del léxico biológico ligado a estas simulaciones, los ingenieros, si es que quieren tener éxito con semejante tarea, todavía deberán luchar con la distinción entre el ciberespacio y el espacio real, y también con las formidables dificultades de intentar tender un puente sobre ese abismo. No obstante, dentro de la comunidad de la vida artificial, donde los objetivos explicativos son más abstractos, tales dificultades apenas se toman en cuenta. Como señaló Howard Pattee en la primera conferencia que se sostuvo sobre el tema: “Muy poco se ha dicho [...] sobre cómo podríamos distinguir entre las simulaciones computacionales de la vida y las elaboraciones de vida artificial”.⁴

Pattee afirma que hay “una diferencia categórica entre el concepto de una elaboración, la cual es una sustitución literal, material, y el concepto de la simulación, la cual es una representación metafórica”. Las simulaciones, dice, “se encuentran en la categoría de las formas simbólicas, no de las sustancias materiales”.⁵ Y les recuerda a sus lectores la advertencia de Von Neumann: “Al axiomatizar así a los autómatas, uno tira por la ventana la mitad del problema y acaso la mitad más importante”.⁶ Para Pattee el problema consiste primordialmente en la relación fundamental que existe entre el símbolo y la materia, y en este proyecto el problema se muestra con particular urgencia en la intrínseca subordinación de la “realidad” del organismo respecto a la “realidad” de su medio ambiente.

Aun así, las formas de vida sintética, elaboradas con componentes materiales y ensambladas en el espacio real, se están construyendo realmente, y de una manera que se deriva directamente de las simulaciones aparentemente vivientes que

² S. Grand, *Creation: Life and How to Make It*, Weidenfeld and Nicholson, Londres, 2000, pp. 7-8.

³ *Ibid.*, p. 83.

⁴ H. H. Pattee, “Simulations, Realizations, and Theories of Life”, en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, Redwood City, 1989, p. 63.

⁵ *Ibid.*, p. 68.

⁶ J. von Neumann, *Theory of Self-reproducing Automata*, University of Illinois Press, Urbana, 1966; citado en H. H. Pattee, *op. cit.*, p. 69.

se han creado en el ciberespacio. La ingeniería es una ciencia que se especializa en salvar el abismo entre el símbolo y la materia, y los ingenieros robóticos, al igual que sus colegas en otras disciplinas asociadas a la ingeniería, han desarrollado las técnicas para pasar de un dominio al otro, para traducir las metáforas de la simulación en la elaboración de objetos materiales. En cierto sentido, las simulaciones computacionales de los organismos biológicos obviamente son, como dice Pattee, “representaciones metafóricas”, pero también son modelos, como los tradicionales planos. En manos de ingenieros hábiles, las simulaciones computacionales se pueden utilizar como planos para la construcción de estructuras materiales. Aquí, los organismos simulados del ciberespacio se usan como planos para elaborar sintéticamente objetos materiales que imitan la conducta de organismos biológicos que habitan el espacio de la realidad. ¿Pero podemos ver a una criatura sintética físicamente elaborada como una “sustitución literal, material” de la criatura que imita? ¿Si camina como un pato y grazna como un pato, es un pato? En este sentido, ¿satisface incluso los criterios menos exigentes que la calificarían de *viviente*?

Sin duda, éstas son cuestiones que a muchos científicos les preocupan, de la misma manera que a todos nosotros. Y aunque no se relacionan directamente con las cuestiones de este libro, tengo algunas opiniones sobre este asunto. Muy brevemente, yo alegraría que aun cuando los organismos sintéticos en el espacio-tiempo físico ya no sean simulaciones computacionales, no dejan de ser simulaciones, aunque materiales. Sin embargo, yo no admito la distinción radical entre la simulación y la elaboración. Por una parte, los materiales de construcción pueden cambiar, y seguramente lo harán. Podrían incluso parecerse tanto a los que sustentan los organismos biológicos y su medio ambiente, que tal distinción desaparecería. Por otra, la convergencia de la simulación y la elaboración, de las construcciones metafóricas y las literales, también puede realizarse mediante la manipulación de los materiales biológicos existentes. Por ejemplo, los científicos de la computación podrían llegar a darse por vencidos respecto al proyecto de la síntesis *de novo* de los organismos artificiales, así como la mayoría de los científicos de la biología al parecer lo han hecho. La ingeniería de nuevas formas de vida en la biología contemporánea avanza por caminos totalmente diferentes, empezando no con las materias primas proporcionadas por el mundo inanimado, sino con las materias primas proporcionadas por organismos biológicos existentes. Las técnicas de la modificación genética, la clonación, y la “evolución dirigida” han probado ser tan exitosas en la ingeniería de nuevas formas biológicas con componentes proporcionados por la biología, que la motivación para intentar la síntesis

de novo de la vida casi ha desaparecido.⁷ Las implicaciones de tales éxitos no han pasado inadvertidas por los científicos de la computación.

De hecho, los trabajos dirigidos a salvar el abismo entre las computadoras y los organismos mediante la explotación de técnicas de ingeniería biológica han avanzado bastante en diversas facultades universitarias de ciencia computacional. Algunos pretenden aplicar el ADN a propósitos computacionales convencionales; en otros, los investigadores han empezado a utilizar las técnicas de la recombinación del ADN para construir redes de regulación de genes específicas, prediseñadas para responder a estímulos particulares, en bacterias reales. Un ejemplo de lo último es parte de un proyecto más extenso y ambicioso que Tom Knight, Jerry Sussman y Hal Abelson recientemente lanzaron en el MIT [Instituto Tecnológico de Massachusetts] con el nombre de computación amorfa.⁸ La motivación para este proyecto se expone por Knight y Sussman en un artículo:

Los actuales avances en la biología pronto nos habrán de proporcionar la comprensión de cómo el código de los organismos existentes produce su estructura y conducta características. Como ingenieros, nosotros podemos asumir el control de este proceso inventando códigos (y, lo que es más importante, desarrollando los métodos automatizados que nos ayuden a comprender, construir y depurar tales códigos) a fin de crear nuevos organismos con las propiedades particulares deseadas.⁹

⁷ Es interesante que los trabajos sobre la "evolución dirigida" también tuvieron su origen en las discusiones que originalmente se sostuvieron en el Santa Fe Institute. En la evolución dirigida, las enzimas diseñadas para realizar tareas específicas se producen ya sea por las bacterias a las que se les ha dado existencia mediante la selección secuencial, en condiciones que cada vez se aproximaban más a la tarea seleccionada, o mediante la selección directa de las proteínas producidas mediante la recombinación en el laboratorio de genes homólogos; véase, por ejemplo, G. F. Joyce, "Directed Molecular Evolution", *Scientific American*, 267 (6): 48-55, 1992; G. F. Joyce, "Evolutionary Chemistry: Getting There from Here", *Science*, 276: 1658-1659, 1997; F. H. Arnold, "Combinatorial and Computational Challenges for Biocatalyst Design", *Nature*, 409: 253-257, 2001; F. H. Arnold y A. A. Volkov, "Directed Evolution of Biocatalysts", *Current Opinion in Chemical Biology*, 3 (1): 54-59, 1999.

⁸ R. Weiss, G. Homsy y T. F. Knight Jr., "Toward *in vivo* Digital Circuits", *Evolution as Computation*, Springer, Berlín/Heidelberg, 2002. Este trabajo es particularmente interesante porque se inspira directamente (y de manera explícita) en los trabajos anteriores de Motoyosi Sugita, "Functional Analysis of Chemical Systems *in vivo* Using a Logical Circuit Equivalent, II: The Idea of a Molecular Automaton", *Journal of Theoretical Biology*, 4 (2): 179-192, 1963; S. A. Kauffman, "Gene Regulation Networks: A Theory for Their Global Structure and Behavior", *Current Topics in Developmental Biology*, 6: 145-182, 1971, y R. Thomas, "Boolean Formalization of Genetic Control Circuits", *Journal of Theoretical Biology*, 42 (3): 563-585, 1973, a fin de construir modelos formales de redes genéticas reguladoras.

⁹ T. F. Knight Jr. y G. F. Sussman, "Cellular Gate Technology", en C. Calude, J. L. Casti y M. J. Dinneen (comps.), *Unconventional Models of Computation*, Springer, Nueva York, 1998, pp. 257-272.

En las investigaciones de este tipo, no puede haber restricción ninguna en la utilización de la maquinaria biológica que los organismos vivientes mismos han desarrollado evolutivamente. Y tampoco, por otra parte, puede haber restricciones respecto a lo que se puede considerar como un organismo. De hecho, en un trabajo subsecuente sobre el tema, Abelson y Forbes señalaron: “La meta última de la computación amorfa consiste en extraer elementos de la biología para ayudar a crear una rama totalmente nueva de la ciencia computacional y de la ingeniería, dedicada a orquestar la utilización de grandes cantidades de elementos computacionales para solucionar problemas”. Como dice Freeman Dyson, los organismos nuevos podrían ser verdes, grises, o de cualquier otro tono intermedio.¹⁰

En resumen, con cada nuevo logro —en la computación biológica y la biología computacional— la brecha entre las computadoras y los organismos es cada vez más angosta y cada vez más elusiva. Así, ya no es necesario ver la computadora genética de que hablan Davidson y sus colegas simplemente como una metáfora o incluso como sólo un modelo. En dos dominios muy diferentes —el diseño de nuevos tipos de computadoras y la modificación de los organismos existentes— estos científicos se plantean por lo menos cierto sentido de literalidad. Sin embargo, la vía mediante la cual tal convergencia se está dando, muy poco se parece al concepto usual de la metáfora científica.¹¹ Aquí, la convergencia es simultáneamente material y abstracta, y uno no puede encontrar un sentido residualmente literal para cualquiera de los referentes. Además, se puede ver que la metáfora misma desempeña un papel principal (se podría decir que incluso instrumental) en la conjunción de sus referentes. Las metáforas hacen mucho más que influir en nuestra percepción del mundo. Además de enfocar la atención de los investigadores, las metáforas guían sus actividades y manipulaciones materiales. De esta forma —en muchos tipos diferentes de laboratorios (biológicos, computacionales e industriales), en los esfuerzos dirigidos a una amplia variedad de fines (teóricos y prácticos, académicos y comerciales)— la asimilación metafórica de las computadoras y los organismos se dirige hacia la elaboración literal de objetivos híbridos. Y entre éstos es conspicua la producción de objetos materiales que no se prestan a ser analizados con base en la categoría de la computadora y la categoría del organismo.

¹⁰ H. Abelson y N. Forbes, “Amorphous Computing”, *Complexity*, 5 (3): 25, 2000; F. Dyson, *Infinite in all Directions*, Harper & Row, Nueva York, 1985.

¹¹ Véase la discusión sobre las metáforas científicas de M. Hesse, “The Explanatory Function of Metaphor”, en M. Hesse, *Revolutions and Reconstructions in the Philosophy of Science*, Indiana University Press, Bloomington, 1980, pp. 111-124.

Sin lugar a dudas, son reales las nuevas “criaturas” que la computación biológica y la biología computacional están produciendo, pero la cuestión más urgente consiste en saber si son o no entes *vivientes*. ¿Se ha tendido un puente ya sobre el abismo entre los entes vivientes y los entes no vivientes, entre el organismo y la máquina? Y si todavía no se ha hecho, ¿debemos aceptar la inevitable vinculación de estos dos reinos en un futuro cercano? ¿Hasta qué punto, y en qué forma, deberán los nuevos tipos de entes parecerse a los productos de la evolución biológica para que merezcan la calificación de “vivientes”?

Tales cuestiones son tan perturbadoras como apremiantes, y por lo menos parte de lo que las hace así se explica por la ansiedad que generan: ¿en qué forma pondrán en riesgo nuestro propio estatus en la Tierra estas nuevas criaturas? ¿Estamos realmente en peligro de ser remplazados, rebasados en la carrera evolutiva por un nuevo tipo de especie?¹² ¿Dónde, aparte del ámbito de la ciencia ficción, podremos buscar las respuestas a estas preguntas? Marc Lange alega que la importancia de la distinción entre los entes vivientes y los no vivientes es una “cuestión empírica. La ciencia es quien tendrá que descubrir la respuesta”.¹³ Por su parte, Steven Levy afirma que es una cuestión tecnológica, que “produciendo la vida podremos finalmente saber lo que es la vida”.¹⁴

Pero yo pienso que es un error esperar de la ciencia o de la tecnología la respuesta. De hecho, estas cuestiones contienen particularidades que podrían descalificarlas totalmente en el reino de la ciencia. Por ejemplo, cuando la gente comúnmente quiere saber si una cosa está o no está viva, ya supone que el objeto en cuestión pertenece al reino biológico. La pregunta es pues diacrónica: ¿está todavía vivo o ya está vivo el objeto (el organismo)? ¿Ha terminado su vida o está por empezar su vida? Aquí, sin embargo, la pregunta no se dirige diacrónicamente, sino sincrónicamente: ¿cómo se puede clasificar este objeto según la taxonomía? ¿Pertenece al grupo de los objetos vivientes o al de los no vivientes? Pero el simple hecho de hacer esta pregunta en esta forma depende de una suposición previa —la suposición de que existe objetivamente una propiedad esencial, definitoria, de la categoría de la vida, o que la vida es lo que los filósofos denominan una “categoría natural”—. ¿Es efectivamente la vida una categoría natural y no meramente una categoría humana? ¿No será, como Foucault alegaba tan provocativamente, que resultaría mejor ver la demarcación entre la vida y la no vida como

¹² Véase H. Moravec, *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence*, Harvard University Press, Cambridge, 1988.

¹³ M. Lange, “Life, ‘Artificial Life’, and Scientific Explanation”, *Philosophy of Science*, 63: 231, 1996.

¹⁴ S. Levy, *Artificial Life: The Quest for a New Creation*, Pantheon Books, Nueva York, 1993, p. 10.

un producto de la historia humana, más que de la evolutiva?¹⁵ ¿No es cierto que la noción misma de que sea posible encontrar “una verdadera definición de la vida” nació hace dos siglos solamente, gracias a Jean Baptiste Lamarck?¹⁶

François Jacob, siguiendo a Foucault, es uno de los muchos autores que creen que fue así. Él afirma que “el concepto de la vida no existía” antes del siglo XIX. ¿Qué quiere decir con esto? No, obviamente, que el término “vida” no se hubiera usado anteriormente, puesto que él contrasta su concepto con las nociones de la vida que ya se habían utilizado: Jacob dice que el suyo, “de acuerdo con la definición en la *Grande Encyclopédie*, es una verdad casi evidente: la vida ‘es lo contrario de la muerte’”.¹⁷ Lo que a él le molesta de las definiciones anteriores es que no son constitutivas; no nos proporcionan una caracterización de “las propiedades de los organismos vivos; no nos dicen lo que la vida es”.¹⁸ Lamarck había planteado el problema en términos similares. “La investigación de los fenómenos que se derivan de la existencia de la vida en un cuerpo no proporciona una definición de la vida, y no revela más que los objetos que la vida misma ha producido.”¹⁹

¹⁵ En *Les mots et les choses: Une archéologie des sciences humaines* (Gallimard, París, 1966, p. 139), M. Foucault afirma que en el siglo XVIII “la vida misma no existía”, afirmación que muchos historiadores desde entonces han objetado. Por ejemplo, J. Schiller (*La notion d'organisation dans l'histoire de la biologie*, Maloine, París, 1978, p. 79) alega: “Lo contrario está más cerca de la verdad: no existía lo inanimado, pero la vida se encontraba en todas partes, penetrándolo todo y animándolo todo”. Sin embargo, pienso que la afirmación de Foucault sí tiene sentido histórico cuando se entiende como una afirmación sobre la “vida misma”, es decir, como una afirmación sobre la vida en cuanto categoría natural.

¹⁶ Lamarck dice: “La investigación de los fenómenos que se derivan de la existencia de la vida en un cuerpo no proporciona definición de la vida ninguna, y sólo expone los objetos que la vida misma ha producido. La línea investigativa que estoy a punto de emprender tiene la ventaja de ser más exacta, más directa y mejor adecuada para iluminar el importante tema bajo consideración; además, propicia el conocimiento de la verdadera definición de la vida”. J. B. Lamarck, *Philosophical Zoology: An Exposition with Regard to the Natural History of Animals*, The University of Chicago Press, Chicago, 1984, p. 201.

¹⁷ F. Jacob, *The Logic of Life*, Pantheon, Nueva York, 1976, p. 89.

¹⁸ Es de señalar que tras el remolino de ensayos y libros con este título en la primera parte del siglo XX, la pregunta “¿qué es la vida?” desapareció entre los biólogos. E. Schrödinger (*What's Life? Mind and Matter*, Cambridge University Press, Cambridge, 1944) la resucitó con la publicación de su famoso libro sobre el tema en 1943 y desde entonces se ha asociado comúnmente con su nombre; muy rara vez o casi nunca citado por los contemporáneos biólogos experimentales. Según P. B. Medawar (*The Life Science: Current Ideas of Biology*, Harper & Row, Nueva York, 1977, p. 7) tales preocupaciones indican “un bajo nivel de conversación biológica”. Los biólogos actuales tácitamente coinciden con la opinión de N. Pirie (“The Meaninglessness of the Terms ‘Life’ and ‘Living’”, en J. Needham y D. E. Green [comps.], *Perspectives in Biochemistry*, Cambridge University Press, Cambridge, 1937, pp. 11-22), quien en los años treinta dijo que la pregunta “no tiene sentido”. “No tiene importancia”, dice Pirie en ese ensayo (p. 22), “que un virus se describa o no como un organismo vivo”. Hoy, la cuestión de lo que la vida es aparece principalmente en las investigaciones del campo de la vida artificial y de la robótica. Y nosotros, al igual que Pirie, podríamos preguntar: ¿qué importancia puede tener para los científicos, los ingenieros, la industria, o los consumidores de sus productos, la cuestión de que los organismos se describan como vivos o no vivos?

¹⁹ J. B. Lamarck, *op. cit.*, p. 201.

Pero para que una caracterización nos diga lo que la vida *es*, necesariamente debe presuponer una esencia modal (y estructural) de la vida, una propiedad definitoria de los entes vivientes que no sea en sí una propiedad viviente, y que sin embargo no exista en todas las cosas no vivientes.

El concepto de la vida jacobiano, tanto como el lamarckiano, dependen de una taxonomía peculiar de los objetos individuales —una que selecciona como factor primordial la demarcación entre lo viviente y lo no viviente y que considera insignificantes todas las demás diferencias entre las diferentes formas de vida—. Es ésta la taxonomía que Lamarck había promulgado a principios del siglo XIX y que según Foucault representa el inicio de la “biología”. No contrasta la vida con la muerte, sino lo viviente con lo “inorgánico”.²⁰ Hace resaltar una distinción a expensas de las demás, desechando no sólo las demarcaciones anteriormente establecidas (sobre todo, entre las plantas y los animales) sino también las diferencias categoriales entre los diversos tipos de estructuras que subsecuentemente habrían de adquirir importancia (los genes, los gametos, las células, los tejidos, los organismos, y acaso también los sistemas autocatalíticos y los autómatas celulares). Siempre que tuvieran las características definitorias esenciales, todas estas estructuras podían calificarse —uniformemente, por así decirlo— de formas de vida.

Pero con mucho el aspecto más interesante de la búsqueda de la esencia definitoria de la vida, y sin duda alguna su mayor peculiaridad, es que, a pesar de que se enfoque en la frontera entre lo viviente y lo no viviente, enfatizando tanto su nitidez como su importancia, esta búsqueda de la esencia de la vida simultáneamente procrea su disolución. Rodney Brooks y sus colegas no son los primeros que han vinculado esta cuestión de lo que la vida es con la ambición de trascender las actuales fronteras —la misma intención dualística ya se puede ver en los escritos de Lamarck y ciertamente se podría decir que es inherente en el establecimiento de la biología como ciencia por derecho propio—. Para Lamarck, la biología habría de ser “una indagación de las causas físicas que dan origen a los fenómenos de la vida”.²¹ “La naturaleza no necesita leyes especiales —dice La-

²⁰ Como dice Lamarck en la obra citada: “Si queremos llegar a un conocimiento real de lo que constituye la vida, de lo que es la vida, de las causas y las leyes que gobiernan un fenómeno natural tan maravilloso, y de cómo la vida misma puede dar origen a los numerosos y sorprendentes fenómenos que poseen los cuerpos vivientes, debemos sobre todo estudiar con atención las diferencias que existen entre los cuerpos inorgánicos y los orgánicos; y por esta razón es necesario comparar las características esenciales de estos dos tipos de cuerpos” (p. 191).

²¹ J. B. Lamarck, *op. cit.*, p. 282.

marck—, aquellas que gobiernan de manera general todos los cuerpos son perfectamente suficientes en este caso.”

Entonces ¿por qué establecer, para empezar, la biología como una ciencia distinta a las demás? ¿Dónde, si no en sus causas o leyes, debemos buscar las propiedades que tan crítica y decisivamente distinguen el campo de esta ciencia del campo de las ciencias físicas, las propiedades que explican la “inmensa diferencia”, el “hiato radical” entre los cuerpos inorgánicos y los cuerpos vivientes?²² La respuesta de Lamarck consistió en destacar la “organización” de la materia viviente: “[...] en la más sencilla de las organizaciones es donde debemos iniciar nuestra indagación sobre lo que la vida realmente es, sobre cuáles son las condiciones necesarias para su existencia, y sobre cuál fuente le proporciona la fuerza especial que estimula los llamados movimientos vitales”.²³ Sin embargo, por su apego a la idea de la perfección de las leyes y causas físicas, él pensaba que también la organización debía tener —y debió tener— orígenes físicos puramente. De ahí su interés en la generación espontánea y el origen de la vida. En otras palabras, como a muchos de sus homólogos en los siglos XIX y XX, la demarcación misma de la vida en cuanto dominio especial le sirvió como un ímpetu para trascenderla —si no prácticamente tendiendo un puente, entonces por lo menos conceptualmente—.²⁴ Sin embargo, aquellos que en la actualidad se interesan sobre todo en las propiedades diferenciadoras de la organización, tienden a enfocar principalmente la construcción de puentes materiales. Pero de cualquier forma, ya sea conceptualmente, ya sea materialmente, tales puentes incitan la formación de nuevas agrupaciones —agrupaciones que necesariamente violan las taxonomías precedentes—. En vez de vincular entre sí como una sola categoría las plantas y los animales, podrían conjugar las computadoras y los organismos; las tormentas, la gente y los paraguas; o los animales, los ejércitos y las máquinas despachadoras.²⁵

²² *Ibid.*, p. 194.

²³ *Ibid.*, p. 185.

²⁴ Aquí mi argumento se relaciona estrechamente con el de R. Doyle, *On Being Living*, Stanford University Press, Stanford, 1997. Él afirma que en vez de constituir el objeto real de la biología, la vida es (meramente) su objeto “sublime”.

²⁵ La referencia a las tormentas, la gente y los paraguas proviene de C. Bennet, “On the Nature and Origin of Complexity in Discrete, Homogeneous, Locally-Interacting Systems”, *Foundations of Physics*, 16 (6): 586, 1986: “En la moderna idea del mundo, la disipación ha usurpado una de las funciones que anteriormente pertenecía a Dios: se considera que la materia trasciende la naturaleza el tipo de pesadez que manifiesta cuando está en equilibrio, y al trascenderla se comporta de manera dramática e imprevista, transformándose, por ejemplo, en tormentas, gente y paraguas”. La referencia a los animales, los ejércitos y las máquinas despachadoras proviene de la definición de un sistema que aparece en un informe que en 1950 se envió a la Fuerza Aérea de los Estados Unidos; véase E. F. Keller, *Refiguring Life: Metaphors of Twentieth Century Biology*, Columbia University Press, Nueva York, 1995, pp. 90-91.

¿Podemos calificar de “vivientes” a estas categorías recientemente formadas? Bueno, depende. Depende de nuestras necesidades e intereses locales, de nuestras estimaciones de los costos y los beneficios de hacerlo, y también, claro, de nuestra situación cultural e histórica. La idea de hacerlo le hubiera parecido absurda a la gente que vivía en la Tierra no hace tanto tiempo —de hecho, a mí me parece absurda hoy—. Pero esto no significa que no habremos de hacerlo, o que no debemos hacerlo. Sólo significa que la pregunta “¿Qué es la vida?” es una interrogante histórica que únicamente se puede responder sobre la base de las categorías que nosotros como actores humanos queremos atenernos y queremos respetar, las diferencias que nosotros como actores humanos queremos honrar, y no sobre la base de la lógica, la ciencia o la tecnología. Es en este sentido que la categoría de la vida es una categoría humana, más que una categoría natural. Una categoría muy similar a la explicación.

BIBLIOGRAFÍA

- Abelson, H. y N. Forbes, “Amorphous Computing”, *Complexity*, 5 (3): 25, 2000.
- Arnold, F. H., “Combinatorial and Computational Challenges for Biocatalyst Design”, *Nature*, 409: 253-257, 2001.
- Arnold, F. H. y A. A. Volkov, “Directed Evolution of Biocatalysts”, *Current Opinion in Chemical Biology*, 3 (1): 54-59, 1999.
- Bennet, C., “On the Nature and Origin of Complexity in Discrete, Homogeneous, Locally-Interacting Systems”, *Foundations of Physics*, 16 (6): 586, 1986.
- Brooks, R., *World Question Center*, Edge Foundation Inc., 1997. Disponible en edge.org/documents/archive/edge31.html (revisado en agosto de 2008). [Véase también, “The Deep Question. A Talk With Rodney A. Brooks”, en Edge Foundation Inc., 19 de noviembre de 1997, edge.org/conversation/the-deep-question.]
- Doyle, R., *On Being Living*, Stanford University Press, Stanford, 1997.
- Dyson, F., *Infinite in all Directions*, Harper & Row, Nueva York, 1985. [Versión en español: *El infinito en todas direcciones*, trad. de Roxana Tabakman, Tusquets, Barcelona, 2004.]
- Foucault, M., *Les mots et les choses: Une archéologie des sciences humaines*, Gallimard, París, 1966. [Versión en español: *Las palabras y las cosas: una arqueología de las ciencias humanas*, Siglo XXI, México, 2010.]
- Grand, S., *Creation: Life and How to Make It*, Weidenfeld and Nicholson, Londres, 2000.

- Hesse, M., “The Explanatory Function of Metaphor”, en M. Hesse, *Revolutions and Reconstructions in the Philosophy of Science*, Indiana University Press, Bloomington, 1980, pp. 111-124.
- Jacob, F., *The Logic of Life*, Pantheon, Nueva York, 1976. [Versión en español: *La lógica de lo viviente. Una historia de la herencia*, Tusquets, Barcelona, 1999.]
- Joyce, G. F., “Directed Molecular Evolution”, *Scientific American*, 267 (6): 48-55, 1992.
- , “Evolutionary Chemistry: Getting There from Here”, *Science*, 276: 1658-1659, 1997.
- Kauffman, S. A., “Gene Regulation Networks: A Theory for Their Global Structure and Behavior”, *Current Topics in Developmental Biology*, 6: 145-182, 1971.
- Keller, E. F., *Refiguring Life: Metaphors of Twentieth Century Biology*, Columbia University Press, Nueva York, 1995.
- Knigh, T. F. y G. J. Sussman, “Cellular Gate Technology”, en C. Calude, J. L. Casti y M. J. Dinneen (comps.), *Unconventional Models of Computation*, Springer, Nueva York, 1998, pp. 257-272.
- Lamarck, J. B., *Philosophical Zoology: An Exposition with Regard to the Natural History of Animals*, The University of Chicago Press, Chicago, 1984. [Versión en español: *Filosofía zoológica*, trad. de Vidal Díaz, Mateu, Barcelona, 1971.]
- Lange, M., “Life, ‘Artificial Life’, and Scientific Explanation”, *Philosophy of Science*, 63: 231, 1996.
- Levy, S., *Artificial Life: The Quest for a New Creation*, Pantheon Books, Nueva York, 1993.
- Medawar, P. B., *The Life Science: Current Ideas of Biology*, Harper & Row, Nueva York, 1977.
- Moravec, H., *Mind Children: The Future of Robot and Human Intelligence*, Harvard University Press, Cambridge, 1988.
- Pattee, H. H., “Simulations, Realizations, and Theories of Life”, en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, Redwood City, 1989.
- Pirie, N., “The Meaninglessness of the Terms ‘Life’ and ‘Living’”, en J. Needham, y D. E. Green (comps.), *Perspectives in Biochemistry*, Cambridge University Press, Cambridge, 1937, pp. 11-22.
- Schiller, J., *La notion d’organisation dans l’histoire de la biologie*, Maloine, París, 1978.
- Schrödinger, E., *What’s Life? Mind and Matter*, Cambridge University Press, Cambridge, 1944. [Versión en español: *¿Qué es la vida?*, Tusquets, Barcelona, 1997.]
- Sugita, M., “Functional Analysis of Chemical Systems in Vivo Using a Logical Circuit Equivalent, II: The Idea of a Molecular Automation”, *Journal of Theoretical Biology*, 4 (2): 179-192, 1963.
- Thomas, R., “Boolean Formalization of Genetic Control Circuits”, *Journal of Theoretical Biology*, 42 (3): 563-585, 1973.

Von Neumann, J., *Theory of Self-reproducing Automata*, University of Illinois Press, Urbana, 1966.

Weiss, R., G. E. Homsy y T. F. Knigh Jr., "Toward *in vivo* Digital Circuits", en L. F. Landweber y E. Winfree (coords.), *Evolution as Computation*, Springer, Berlín/Heidelberg, 2002.

CUARTA PARTE

DEFINICIÓN Y EXPLICACIÓN DE LA VIDA

Los capítulos de esta parte enfocan la cuestión primordial: ¿qué es la vida? A esta pregunta no se puede contestar proporcionando una lista de los entes que están o que alguna vez estuvieron vivos. Esta pregunta indaga la naturaleza misma de la vida, aquello que califica a algo de ser viviente; en este sentido la vida no se contrasta con la muerte, sino más bien con la no vida. Esta parte contiene una compilación de diversas perspectivas, pero todos los autores comparten la convicción de que hay algo especial y fundamental en los sistemas vivientes y que por lo tanto es necesaria una explicación general, unificada, de la vida. Como patentizan los capítulos de Elliot Sober y de Evelyn Fox Keller en la tercera parte, algunos investigadores dudan de la utilidad que pueda tener la formulación de teorías generales de la vida.

A través de esta parte es aparente el desacuerdo sobre si la materia de que la vida se compone es esencial para ésta. Algunos de los autores simplemente suponen que tal es el caso, aunque también puedan enfatizar la manera en que se estructura (ordena espacialmente). Otros explican la vida sobre la base de las propiedades abstractas organizativas o funcionales que son independientes de la materia que la compone. La forma en que se entienda este problema tiene consecuencias críticas en la posibilidad de la creación de una vida artificial real (véase la tercera parte) así como en la posibilidad de la existencia de formas de vida natural auténticamente alienígenas (véase la segunda parte). Los autores (por ejemplo Dawkins en el capítulo xxix y Bedau en el capítulo xxxi) que identifican la vida con ciertas propiedades abstractas (la evolución darwiniana y la adaptación flexible, respectivamente) permanecen abiertos a la posibilidad de formas de vida compuesta de diferentes tipos de materia: por ejemplo, los robots estereotípicos (hechos de sílice, metal y plástico), las estructuras puramente informáticas (digitales) y las criaturas extraterrestres compuestas de sílice, como la famosa Horta de *Star Trek* [*Viaje a las estrellas*]. Entre los autores que creen que la posibilidad de la vida está condicionada por limitaciones composicionales, hay un desacuerdo respecto al verdadero alcance de éstas. Para Ruiz-Mirazo y sus colegas (capítulo xxv), Sterelny y Griffiths (capítulo xxviii) y Kauffman (capítulo xxx) el requisito fundamental es que la vida sea química, lo cual descarta las formas de vida infor-

mativas y los robots estereotípicos. Al otro extremo, para Pace (capítulo xi) la vida se limita a moléculas que contengan carbono, lo cual relega a la pobre Horta a la clase de los entes no vivientes. Benner y sus colegas defienden una posición intermedia, explorando algunas posibilidades específicas de un tipo de vida química no basada en el carbono, y descartando otras. Será necesario que se centre la atención todavía más en la cuestión de si —y hasta qué punto— la materia de que la vida se compone es esencial para la vida. Muchos investigadores simplemente suponen una respuesta sin molestarse en explorarla o defenderla.

Los autores de esta parte también están en desacuerdo sobre la manera adecuada de responder a la pregunta de “qué es la vida”. Como se ve en muchos de los capítulos de esta antología, las especulaciones sobre el origen, amplitud y naturaleza de la vida comúnmente se enmarcan en una “definición” de la vida. En un ensayo escrito en el decenio de 1970 que hoy se considera como un clásico y que se reproduce en el capítulo xxiii de esta sección, el astrónomo Carl Sagan hace un escrutinio de las definiciones de la vida por entonces populares, a saber, la “fisiológica”, la “metabólica”, la “bioquímica”, la “genética” (la selección natural darwiniana), y la “termodinámica”. Sagan señala que ninguna de éstas es satisfactoria; para todas hay importantes contraejemplos, los cuales abarcan desde la inapropiada inclusión de las llamas de las velas hasta la inapropiada exclusión de las mulas. Además, dice Sagan, todas se basan en tan sólo un ejemplo de la vida: la vida contemporánea en la Tierra. Como observa Sagan, y Cleland y Chyba también lo enfatizan en el capítulo xxvi, no es posible generalizar sobre la vida en su totalidad a partir de tan sólo un ejemplo de la vida. Es difícil, si no imposible, determinar cuáles aspectos de la vida conocida en la Tierra son esenciales para *toda* la posible vida y cuáles son el resultado de meras contingencias evolutivas.

El ensayo de Sagan generó un frenesí de actividad en relación con las definiciones de la vida. Se realizaron intentos para rescatar del descrédito a algunas de las definiciones por él cuestionadas, redefiniéndolas a fin de evadir las evidencias contrarias; es un buen ejemplo la definición evolutiva de Bedau que aparece en el capítulo xxxi y se basa en la adaptación flexible (a diferencia de la selección natural). Menos optimistas sobre la viabilidad del rescate, otros propusieron nuevas definiciones; por ejemplo, las basadas en la autopoiesis (Maturana y Varela)¹ o la cibernética (Korzeniewski).²

¹ H. R. Maturana y F. J. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, 1980.

² B. Korzeniewski, “Cybernetic Formulation of the Definition of Life”, *Journal of Theoretical Biology*, 209: 275-286, 2001.

Aceptando las fallas de las más populares definiciones de la vida, el biólogo Daniel Koshland en el capítulo xxiv opta por definir la vida como un grupo de características o, en sus palabras, “principios” o “pilares”. Para él son siete las características esenciales de la vida. En la medida que enfocan como la vida “opera”, éstas son funcionales. Algunas son muy abstractas, por ejemplo, el requisito de que la vida tenga un “programa”, mientras otras ponen restricciones (no muy estrictas) en la composición de la vida, por ejemplo, el requisito de la “separación” (aislamiento), que según él presupone vías químicas. En consecuencia, su definición no es totalmente abstracta, pues requiere que la vida sea un sistema químico de alguna especie, descartando así la vida artificial “suave” (que consiste en simulaciones informáticas y otras estructuras digitales) y la vida artificial “fuerte” (los robots mecánicos). Sin embargo, Koshland no excluye la posibilidad de que estos principios puedan implementarse en sistemas químicos muy diferentes de los de la vida terráquea. Sin embargo, Ruiz-Mirazo y sus colegas en el capítulo xxv alegan que definiciones como las de Koshland resultan redundantes y no sistemáticas, no siendo más que listas manipuladas y por lo tanto careciendo de poder explicativo; Mark Bedau ofrece un argumento similar.³

El filósofo Kepa Ruiz-Mirazo y sus colegas en el capítulo xxv intentan formular una definición de la vida más lógica y sofisticada. Empiezan por distinguir entre las definiciones “esenciales” y las “descriptivas”. Ambos tipos de definiciones son completas en el sentido de proporcionar las condiciones necesarias y suficientes para la vida (determinando a cuál categoría pertenece el tipo de elementos abarcado por el término que se define). Alegan sin embargo que sólo las definiciones esenciales son capaces de explicar la vida. Siguiendo a Oparin (capítulo v), también insisten en que una definición satisfactoria de la vida sea “genealógica”, en el sentido de arrojar luz en el proceso mediante el cual la vida se origina; como expusimos en la introducción a la segunda parte, éste es un asunto controvertido.

Tras hacer una crítica de algunas de las definiciones populares de la vida, Ruiz-Mirazo y sus colegas enfocan dos definiciones que según ellos son prometedoras, a saber, la definición química darwiniana de la NASA,⁴ y las definiciones autopoieticas (que identifican la vida con la red de procesos mínima que se requiere para el automantenimiento y la autoproducción), alegando que ambas

³ M. A. Bedau, “The Nature of Life”, en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Nueva York, 1996, pp. 332-357.

⁴ G. F. Joyce, “Foreword”, en D. W. Deamer y G. R. Fleischaker (comps.), *Origins of Life: The Central Concepts*, Jones & Bartlett, Boston, 1994, pp. ix-xii.

definiciones son problemáticas. Las definiciones darwinianas no pueden explicar el metabolismo, que según ellos es más rico y complejo de lo que se suele pensar. También argumentan que a pesar de captar gran parte de la rica complejidad del metabolismo, el defecto de las definiciones autopoieticas es que son demasiado abstractas (pues ignoran los requisitos materiales y energéticos necesarios para implementar los sistemas autoproductos) y no pueden explicar la diversidad y el aumento de la complejidad biológica. En vez de considerar a una como fundamental y a la otra como derivativa, Ruiz-Mirazo y sus colegas alegan que una buena definición de la vida debe explicar cómo los aspectos “individuales-metabólicos” de la vida comprendidos en las definiciones autopoieticas se realizan físicamente y se vinculan con los aspectos “colectivos-ecológicos” de la vida abarcados por las definiciones darwinianas. A este fin ellos formulan una nueva definición que combina ambos aspectos: “un sistema viviente es cualquier sistema autónomo con capacidades evolutivas abiertas”. Puesto que explícitamente requiere que la vida sea un sistema químico, su definición descarta las formas de vida artificial “fuerte” y “suave”; sin embargo, para ellos las posibilidades de tipo químico están totalmente abiertas. Ruiz-Mirazo y sus colegas alegan que su definición ofrece ventajas prácticas para la clarificación de cómo la vida se originó en la Tierra y para la búsqueda de la vida extraterrestre. No todo el mundo está convencido de que una definición puede proporcionar una explicación de la vida científicamente válida. Cleland y Chyba (capítulo xxvi), Sterelny y Griffiths (capítulo xxviii), y Bedau (capítulo xxxi, así como también Lange en el capítulo xvii de la tercera parte) coinciden en que una definición científica satisfactoria de la vida requiere una teoría universal de la vida. Sterelny y Griffiths y Bedau también creen que las definiciones provisionales pueden representar papeles importantes en la consecución de tal teoría. Cleland y Chyba no piensan así. Según ellos, las definiciones de la vida pueden despistar a los científicos respecto a las propiedades esenciales de la vida, así como cegarlos respecto a las formas realmente “extrañas” de vida que acaso llegaran a encontrar en las misiones espaciales.

El filósofo Carol Cleland y el científico planetario Christopher Chyba exponen un argumento bien sustentado contra la utilización de las definiciones para explicar la vida, señalando que las definiciones no pueden ir más allá de nuestros conceptos actuales a fin de decirnos algo sobre un mundo de la naturaleza independiente de la mente. En consecuencia, las definiciones no proporcionan respuestas científicas convincentes a las preguntas sobre la vida. A la mayoría de los científicos no les interesa saber lo que actualmente *suponemos* que la vida es; les interesa saber lo que la vida *realmente es*, cuestión en que también hace hin-

capié Bedau.⁵ Cleland y Chyba examinan diversos tipos de definiciones, incluidas las operativas, estipulativas (científicas o teóricas) e “ideales” (completas en el sentido lógico técnico). También discuten brevemente y rechazan una alternativa popular al planteamiento definicional, la de las relaciones de parentesco wittgensteinianas que rempazan las series “disgregadas” de descripciones, por las condiciones necesarias o suficientes (o por ambas). Según ellos, las teorías de tipo “serial” padecen todavía del problema central del planteamiento definicional: explicar la *naturaleza* de la vida con base en nuestro actual *concepto* de la vida.

La discusión en torno a las definiciones y a las relaciones de parentesco plantea el desconcertante problema de cómo identificar las propiedades esenciales de la vida independientemente de nuestro actual concepto de la vida. Según Cleland y Chyba, tal cosa requiere la formulación de una “declaración de identidad teórica” (que no es igual a una definición teórica) derivada de una teoría general de la vida que se sustente realmente en datos empíricos. Como ellos dicen, el problema está en que actualmente no podemos formular una teoría de este tipo porque nuestra experiencia de la vida se limita a tan sólo un caso, el de la vida conocida en la Tierra; a pesar de su diversidad morfológica, toda la vida conocida en la Tierra es sorprendentemente similar en el nivel molecular y bioquímico (véase la segunda parte). Necesitamos otros ejemplos de la vida a fin de poder formular una teoría de la vida realmente general.

Cleland y Chyba terminan su ensayo con una nueva propuesta para la búsqueda de las formas de vida desconocidas, a falta de una definición o teoría. La idea consiste en utilizar la vida terráquea conocida a fin de formular diversos “criterios tentativos” para la identificación de “anomalías”, sistemas físicos extraños que tienen cierto tipo de semejanza con la vida tal como la conocemos y que sin embargo también poseen aspectos desconcertantes que los distinguen de ésta. A diferencia de las definiciones, los criterios tentativos no pueden determinar si un sistema físico es un sistema viviente; su propósito consiste en identificar los sistemas físicos que valdría la pena someter sucesivamente a la investigación científica. Cleland y Chyba alegan que los criterios tentativos tienen ventajas significativas sobre las definiciones. Pueden ser modificados a la luz de nuevos datos y no resulta necesario decidir cuáles son las características (por ejemplo, el metabolismo o la reproducción) más fundamentales de la vida terráquea conocida. Los criterios tentativos incluso podrían elegir características que no son univer-

⁵ M. A. Bedau, “The Nature of Life”, *op. cit.*

sales en la vida terráquea, por ejemplo, las adaptaciones que se presentan en los microbios que subsisten en condiciones ambientales extremas.

El ensayo de Cleland y Chyba plantea varias cuestiones filosóficas sobre la estructura de las teorías científicas y la forma en que éstas explican los fenómenos naturales. Su razonamiento supone explícitamente que la vida es una *categoría natural* —una categoría de la naturaleza, como lo es la categoría del agua, del oro o de la electricidad— que existiría aun cuando no hubiera seres humanos que hablaran o pensarán sobre ella.⁶ Si la vida no fuera una especie natural, entonces no sería probable que los científicos pudieran formular una auténtica teoría universal de la vida. Cleland y Chyba aceptan que la cuestión de si la vida es o no una especie natural es controvertida y debatible. Evelyn Fox Keller lo niega, alegando que la vida no es una especie natural; resulta significativo que su argumento no se apoye en un escepticismo global (antirrealista) respecto a las especies naturales. (Más adelante se discute aquí el antirrealismo.) Cleland y Chyba plantean todavía otras cuestiones debatibles respecto a cómo las declaraciones de identidad se infieren de las teorías científicas y se justifican con las pruebas empíricas, y respecto a si en principio son o no realmente diferentes una declaración de identidad teórica y una definición teórica.

Hasta hace poco, los filósofos de la ciencia han buscado en la física ejemplos paradigmáticos de teorías científicas. La teoría de Isaac Newton es un ejemplo conocido. Esta teoría unifica una enorme diversidad de fenómenos físicos (el movimiento de los objetos en caída libre, el choque entre sí de bolas de billar, la oscilación de los péndulos, el ascenso y descenso de las mareas, las órbitas de los planetas, etc.) dentro de un sistema lógico que consiste en tres leyes fundamentales del movimiento, en la ley de la gravitación universal y en una serie de conceptos teóricos (la fuerza, la masa, el espacio y el tiempo). Pero los filósofos de la ciencia se han dado cuenta de que no todas las teorías científicas se parecen a las teorías de la física. Las leyes de la física se caracterizan tradicionalmente como leyes sin excepciones, como generalizaciones universales necesarias (físicamente *vs.* lógicamente).⁷ Pero nadie ha podido identificar cualquier generalización biológica específica de esta índole.⁸ Lo mismo se puede decir respecto a las posibles

⁶ Para más sobre las categorías naturales, véase A. Bird y E. Tobin, "Natural Kinds", en E. N. Zalta (comp.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edición de la primavera de 2009. Disponible en <<http://plato.stanford.edu/archives/spr2009/entries/natural-kinds>>.

⁷ Para más detalles, véase R. Harré, "Laws of Nature", en W. H. Newton-Smith (comp.), *A Companion to the Philosophy of Science*, Blackwell Publishing, Oxford, 2000.

⁸ J. Beatty, "The Evolutionary Contingency Thesis", en G. Wolters y J. G. Lennox (comps.), *Concepts, Theories, and Rationality in the Biological Sciences*, University of Pittsburg Press, Pittsburg, 1995.

generalizaciones de otras “ciencias especiales” como la geología y la psicología. Aunque comúnmente se piensa que las generalizaciones de las ciencias especiales son “reducibles” a las de la física fundamental, en principio, si no en la práctica, la filosofía de la ciencia recientemente ha sugerido que podría ser deficiente el análisis tradicional de las leyes naturales. Nancy Cartwright ha alegado convincentemente que incluso las más fundamentales generalizaciones de la física están sujetas a excepciones.⁹ A la luz de estas y otras consideraciones (tales como el problema de entender en qué consiste una necesidad física, a diferencia de una necesidad lógica o metafísica), algunos filósofos han propuesto concepciones menos exigentes de la ley natural.¹⁰ Otros rechazan lo que pudiera ser una concepción global de la teoría científica, diciendo que si bien todas las teorías científicas requieren principios generales de *algún* tipo, éstos asumen formas diferentes en las distintas disciplinas científicas y a veces describen pautas definidas o mecanismos causales, en vez de regularidades sin excepciones (véase el ensayo de Kim Sterelny y Paul Griffiths en el capítulo xxviii de esta parte).

Entre las cuestiones interrelacionadas por los principios generales de una teoría científica, están las *categorías teóricas*. Algunos ejemplos serían la masa en la teoría de Newton, el gen en la genética y el ego en la psicología freudiana. No es posible “observar” de manera directa los tipos teóricos con los sentidos solamente, sin la ayuda de aparatos, y no obstante es evidente que son parte imprescindible del poder explicativo de las teorías científicas. En consecuencia, entre los filósofos se debate vivamente su estatus metafísico. ¿Debemos entenderlos como especies naturales —categorías que la naturaleza esculpe (por así decirlo), a diferencia de los intereses y preocupaciones humanas— o simplemente como herramientas útiles para la sistematización y la unificación de la experiencia fenoménica? Los realistas científicos se ubican en esta última posición, mientras que los antirrealistas (por ejemplo, los instrumentalistas) en la anterior.¹¹ En este contexto es importante no olvidar que ningún realista cree que los tipos teóricos propuestos por las actuales teorías científicas representan auténticas divisiones de la naturaleza. La historia nos aconseja recordar que algunas teorías con el tiempo se sustituyen por teorías mejores que recurren a nuevas especies naturales.

Gran parte del poder explicativo de una teoría científica se deriva de la manera en que incluye las propiedades y categorías fenoménicas en principios y ca-

⁹ N. Cartwright, *How the Laws of Physics Lie*, Oxford University Press, Oxford, 1983.

¹⁰ Véase, por ejemplo, S. D. Mitchell, “*Ceteris Paribus*: An Inadequate Representation for Biological Contingency”, *Erkenntnis*, 57: 329-350, 2002.

¹¹ Para más detalles sobre este debate, véase S. Psillos, *Scientific Realism: How Science Tracks the Truth*, Routledge, Londres, 1999.

tegorías fundamentales. Cleland y Chyba afirman que los vehículos para tal poder explicativo son las declaraciones teóricas identificadoras que los filósofos Saul Kripke¹² y Hilary Putnam¹³ divulgaron e hicieron famosas mediante sus investigaciones de los tipos naturales. Un ejemplo muy gastado es el de “el agua es H₂O”, que ostensiblemente identifica el agua, tan familiar en nuestra vida cotidiana, con ciertas categorías de la química contemporánea, a saber, el hidrógeno, el oxígeno y el enlace covalente.

Las declaraciones de identidad teóricas se parecen mucho a las definiciones lógicas, en la medida en que poseen las condiciones necesarias y suficientes para participar en la extensión de un término general. En consecuencia, muchos científicos sospechan que la distinción entre las declaraciones de identidad teóricas y las definiciones teóricas no es muy significativa. Puesto que son estipulativas, las definiciones teóricas no disectan con mayor precisión que las declaraciones de identidad teórica el concepto que asociamos con una generalización, tal como la “vida”; las definiciones teóricas son poco más que decisiones explícitas que elaboramos a fin de modificar el concepto asociado con un término. Además, se ha dicho que una vez que los científicos se convencieron de que el agua es H₂O, la afirmación de que el agua es H₂O adquirió el estatus de una definición: se convirtió literalmente en nuestro concepto *científico* del agua. Cleland y Chyba rechazan tales alegaciones, argumentando que las declaraciones de identidad teórica se establecen mediante la investigación empírica, a diferencia de la estipulación o del análisis conceptual. En otras obras¹⁴ Cleland va aún más lejos, afirmando que las declaraciones de identidad teóricas ni siquiera son verdaderas identidades, cosa que debilita todavía más la afirmación de que son definiciones teóricas. Por otra parte, muchos científicos que pretenden definir la vida no están familiarizados con la noción técnica y lógica de una definición. En consecuencia, acaso fuera más apropiado reinterpretar sus “definiciones” como declaraciones de identidad teóricas. Cleland y Chyba lo rechazarían, alegando que las “identidades” teóricas válidas presuponen (se articulan como) teorías científicas, y que actualmente todavía carecemos de un marco empíricamente convincente para una teo-

¹² S. A. Kripke, *Naming and Necessity*, Harvard University Press, Cambridge, 1972.

¹³ H. Putnam, “Explanation and Reference”, en R. J. Pearce y P. Maynard (comps.), *Conceptual Change*, D. Reidel, Dordrecht, 1973, pp. 199-221; H. Putnam, “The Meaning of ‘Meaning’”, en K. Gunderson (comp.), *Language, Mind, and Knowledge*, University of Minneapolis, Mineápolis, 1975, pp. 215-271.

¹⁴ C. E. Cleland, “Understanding the Nature of Life: A Matter of Definition or Theory?”, en J. Seckbach (comp.), *Life as We Know It*, Springer, Dordrecht, 2006, pp. 589-600; C. E. Cleland, *The Quest for a Universal Theory of Life: Searching for Life as We Don’t Know It*, Cambridge University Press, Cambridge, en prensa.

ría general de la vida. Esto plantea la interesante cuestión de cuál es la diferencia entre una compleja definición teórica o una declaración de identidad teórica, y una teoría. Estas cuestiones multifacéticas precisan mayor reflexión por parte de los filósofos de la ciencia.¹⁵

El capítulo xxvii es un ensayo poético de la microbióloga Lynn Margulis y el escritor científico Dorion Sagan, extraído de su libro sobre la diversificada e interconectada red de la vida en la Tierra. Ellos hacen hincapié en el hecho de que la materia y la energía fluyen incesantemente a través de todos los organismos vivos, de manera que la vida debería verse como un proceso. Para ellos los organismos vivos son patrones regulares que emergen del flujo de la materia y la energía a través de ciertos tipos de sistemas químicos extremadamente complejos, desarrollándose y adaptándose. Esta perspectiva considera esencial para la vida el proceso metabólico autopoiético del automantenimiento y la autoproducción. Pero ya que la vida continuamente se expande y desarrolla de manera impredecible, Margulis y Sagan concluyen que “la autopoiesis, la reproducción y la evolución sólo abarcan una parte de la totalidad y riqueza de la vida”. No creen que la vida sea algo que se pueda captar mediante una definición o cualquier otra generalización fija, pues la vida continuamente cambia y evoluciona, creando nuevas formas de vida que participan en interacciones cada vez más intrincadas con su entorno.

Margulis ha sido una defensora vigorosa de la hipótesis de Gaia que originalmente formuló el científico James Lovelock en 1979.¹⁶ Esta hipótesis propone que la superficie de la Tierra, junto con el aire, el agua y las formas de vida que sobre ella se extienden, forma un complejo sistema que se autorregula y automantiene, la llamada “Gaia”. Si realmente se producen o no el automantenimiento y la autorregulación propuestos por esta hipótesis, es algo que se sigue debatiendo. Ampliando la hipótesis de Gaia, Margulis y Sagan también expresan la todavía más controvertida idea de que Gaia (un sistema global fisicoquímico que se automantiene) debe considerarse como una atípica pero genuina forma de vida. En el capítulo xxviii, Kim Sterelny y Paul Griffiths discuten algunos de los problemas empíricos y conceptuales que surgen de ver en Gaia un auténtico organismo vivo.

Desde la perspectiva de Margulis y Sagan, es desacertado considerar que la

¹⁵ Para una discusión más amplia sobre el tema, véase S. Psillos, *Scientific Realism: How Science Tracks the Truth*, Routledge, Londres, 1999, y C. E. Cleland, *The Quest for a Universal Theory of Life, Searching for Life as We Don't Know It*, Cambridge University Press, Cambridge, en prensa.

¹⁶ J. E. Lovelock, *Gaia: A New Look at Life on Earth*, Oxford University Press, Oxford, 1979.

vida es primordialmente la vida de los organismos *individuales*, de una (sola) bacteria, de un roble o de un antílope, por ejemplo. Según ellos, la Tierra es una comunidad viviente de cuatro dimensiones (espacio-tiempo), entrelazada e integrada, que existe en muchos niveles organizativos. Por lo tanto, es un error pensar que las propiedades que tradicionalmente se le atribuyen a la vida, a saber, el metabolismo, la reproducción y la evolución, captan totalmente la esencia de la vida. Todos los organismos participan en más de una vida como individuos y como miembros de comunidades distintas: “Los humanos son animales y los microbios son sustancias químicas”. Margulis y Sagan incluso alegan que la humanidad misma como sociedad se está transformando en un nuevo ser orgánico de otro nivel y que Gaia podría extenderse más allá de la Tierra en el Sistema Solar, y todavía más allá de éste.

La perspectiva holística gaiana rompe radicalmente con la tradicional teorización biológica que enfoca los organismos individuales y sus poblaciones, pero la hipótesis podría convertirse en una convincente teoría científica con principios generales y categorías teóricas. De hecho, algo muy semejante sucedió con una teoría anterior que Lynn Margulis también había propuesto resueltamente. La teoría endosimbiótica, según la cual las formas de vida eucariotas surgieron de la fusión simbiótica de bacterias independientes, aunque fue inicialmente ridiculizada, hoy aparece en los textos de biología comunes.

Al igual que Cleland y Chyba, los filósofos Kim Sterelny y Paul Griffiths (capítulo xxviii) se preocupan menos por proporcionar una verdadera explicación de la vida que por sentar las bases para su formulación. Asumiendo que la vida es una categoría natural, ellos alegan que es posible descubrir su esencia mediante la ciencia empírica normal, de manera análoga a como descubrimos que el agua es H₂O. Hacen hincapié en el hecho de que los biólogos no necesitan una definición de la vida para realizar avances científicos, así como la gente no necesita consultar un diccionario para utilizar la palabra “vida” en sus conversaciones usuales. Según ellos, una definición no ayudaría en la solución de casos extraños, extremos y controvertidos, como los de los virus, los priones, las colonias sociales de los insectos, y como el singular caso de Gaia. Al contrario, las suposiciones pre-teóricas sobre estos casos podrían determinar cómo evaluamos las definiciones propuestas. Sin embargo, ellos creen que las definiciones son útiles para demarcar distinciones que de otra forma se conjugarían y confundirían. Pero, sobre todo, ellos creen que es posible proseguir con un proyecto empírico de biología universal, intentando estudiar las características esenciales de todas las formas de vida conocidas y potenciales, sin una definición de la “vida”.

Sterelny y Griffiths señalan que el proyecto de una biología universal y la búsqueda de una teoría universal de la vida se enfrentan a grandes obstáculos. En primer lugar, está el reto de descubrir leyes naturales distintivamente biológicas. Como mencionamos antes, los filósofos tradicionalmente han pensado que las leyes naturales no tienen excepciones, que son necesarias, y que constituyen generalizaciones universales, pero los biólogos todavía no han descubierto cualquier generalización distintivamente biológica de tal índole. Sin embargo, como observan Sterelny y Griffiths, esa concepción, según la cual los principios integran las teorías científicas, se ha cuestionado en años recientes, y la teorización biológica al parecer se puede adecuar a concepciones más amplias. Sterelny y Griffiths también subrayan que la vida en la Tierra no proporciona una buena base para la generalización de toda la vida. Ellos critican los conocidos trabajos de Gould,¹⁷ Dawkins¹⁸ y Kauffman¹⁹ que pretenden identificar los principios universales de la vida, y uno de sus temas centrales es que la propuesta de una biología universal tiene que preocuparse más profundamente por la cuestión de cómo se realiza la complejidad biológica. Por lo tanto, Sterelny y Griffiths presumiblemente aprobarían la orientación bioquímica de las discusiones sobre los aspectos universales de la vida que exponen Norman R. Pace en el capítulo XI y Steven A. Benner y sus colegas en el capítulo XII, aunque acaso cuestionarían algunas de sus conclusiones específicas.

Sterelny y Griffiths se muestran escépticos respecto a las simulaciones de la vida artificial, diciendo que este campo se ha “sobreevaluado”. Opinan que las simulaciones de formas de vida artificiales pueden proporcionar valiosas informaciones sobre la vida, al extraer de las especulaciones teóricas consecuencias empíricamente verificables. Sin embargo, rechazan tanto la tesis de la vida artificial fuerte (suave) que dice que una simulación computacional podría considerarse literalmente viva, como la perspectiva funcionalista de la vida con que esta tesis se asocia. Dudan que los sistemas computacionales de la vida artificial jamás habrán de producir un segundo caso de vida, puesto que según ellos es ingenua e insuficientemente jerárquica la distinción que establece la vida artificial fuerte (suave) entre la forma (la función, la estructura y la organización) y la materia (composición material). No podemos saber si aprobarían o no alguna de las más

¹⁷ S. J. Gould, *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History*, W. W. Norton & Company, Nueva York, 1989.

¹⁸ Véase el capítulo XXIX de esta obra.

¹⁹ Véase el capítulo XXX de esta obra. S. A. Kauffman, *The Origins of Order: Self-organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, Nueva York, 1993; S. A. Kauffman, *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-organization and Complexity*, Oxford University Press, Nueva York, 1995.

complejas y jerárquicas formas funcionalistas de ver la vida que incorporaran restricciones físicas adicionales en los niveles más bajos.

Los restantes capítulos de esta parte (Dawkins, Kauffman y Bedau) representan tres diferentes planteamientos contemporáneos en relación con la formulación de una teoría general de la vida. Sus respectivas teorías pretenden unificar una amplia gama de fenómenos relevantes (desde la vida extraterrestre a la vida artificial) en un solo marco teórico. Instamos al lector a que al leerlas recuerde las consideraciones sobre las teorías científicas y la vida expuestas en los capítulos anteriores de esta parte.

El biólogo evolucionista Richard Dawkins en el capítulo xxix alega que no tenemos que buscar más allá de la teoría de Darwin de la evolución mediante la selección natural, una teoría de la vida adecuadamente general. Él defiende la idea biológica ampliamente aceptada de que la selección natural proporciona la mejor explicación de las propiedades que le dan a los organismos individuales la apariencia de haber sido diseñados expresamente (la autoorganización, la autorreproducción, el automantenimiento, la adaptación, etc.). Dawkins piensa que la complejidad adaptativa es el mejor diagnóstico de la presencia de la vida misma. Dawkins pretende que su tesis sea interpretada en sentido muy amplio y que englobe cualquier forma de vida que pudiera existir en cualquier parte del universo, contribuyendo así a una “biología universal” que él define como el estudio de lo que es singularmente verdadero en todas las actuales y posibles formas de vida. Dawkins amplía aún más su tesis diciendo: “Si encontramos en cualquier parte del universo una cosa cuya estructura sea compleja y tenga la apariencia de haber sido diseñado para cumplir con cierto propósito, entonces esa cosa o está o estuvo viva, o es un artefacto creado por algo que está o estuvo vivo”. La parte principal de este capítulo se dedica a exponer el argumento de otra tesis de Dawkins: la evolución darwiniana (la selección natural que opera con base en la variación aleatoria heredable) es el único mecanismo jamás propuesto que explica adecuadamente la complejidad adaptativa organizada. Su argumento consiste en considerar y rechazar todas y cada una de las alternativas, según él viables, de la selección natural darwiniana. Mucho espacio se agota en la impugnación de la posibilidad de la evolución lamarckiana (la herencia de las características adquiridas); a Sterelny y Griffiths (capítulo xxviii), sin embargo, no les convencen sus alegatos.

En varias obras influyentes, el bioquímico y biólogo teórico Stuart Kauffman ha desarrollado un fundamento distinto para una teoría general de la vida;²⁰ el

²⁰ S. A. Kauffman, *The Origins of Order*, op. cit.; S. A. Kauffman, *At Home in the Universe*, op. cit.

ensayo reproducido en el capítulo xxx es un buen resumen de su teoría. Kauffman rechaza la idea ampliamente divulgada de que los procesos evolutivos (la selección natural, según Dawkins) son la fuente primordial de la complejidad adaptativa organizada, la cual abarca la autoorganización, la autorreproducción, el auto-mantenimiento y la adaptación. Según Kauffman, en la física se encuentra la explicación de la complejidad adaptativa organizada, especialmente la espontánea emergencia de la organización a cierto nivel de complejidad en los sistemas de reacciones químicas lejos del equilibrio (es decir, los sistemas termodinámicos abiertos). Al aumentar la diversidad molecular del sistema, éste llega a un umbral crítico (la “transición de una fase”), de donde emerge espontáneamente una red de reacciones químicas colectivamente autocatalíticas y autorreproductoras que le permiten al sistema actuar a fin de beneficiarse a sí mismo (de mostrar los aspectos organizativos que tradicionalmente se le atribuyen a la vida). Así, según su teoría, la complejidad adaptativa organizada aparece antes que la selección natural; él piensa que ésta ha representado un papel importante en la historia de la vida, pero que su inicio estuvo más ordenado de lo que muchos suponen. La vida, para Kauffman, es un “sistema molecular colectivamente autocatalítico”.

Si bien Kauffman no es un partidario de la vida artificial fuerte (suave), él ha sido uno de los fundadores de la vida artificial, y sus argumentos contra las ideas darwinianas se apoyan en una serie de complicadas simulaciones computacionales de los sistemas adaptativos complejos. Kauffman hace hincapié en que estos modelos de vida artificial suave generan una buena cantidad de orden inesperado, en que este orden se da “gratis” y sin necesidad alguna de una fundamentación darwiniana. El argumento de Kauffman se aplica a los sistemas termodinámicos abiertos y considera el comportamiento esperado de los sistemas bajo diferentes regímenes de parámetros. En un modelo de una red booleana aleatoria, si el sistema ha superado cierto umbral mínimo de complejidad, entonces tenderá a mostrar una dinámica colectiva estable, porque en el espacio de los estados posibles del sistema hay “pequeños atractores”. Otro modelo representa una serie de sustancias químicas reactivas, la cual es autocatalítica en el sentido de que cada sustancia de la serie se produce por reacciones que sólo se catalizan por las otras sustancias de la misma serie. Así, a fin de cuentas, la serie de sustancias químicas cataliza su propia producción.

Kauffman cree que estas series autocatalíticas abstractas proporcionan modelos teóricamente fructíferos de sistemas químicos vivos. Él dice que tales modelos pueden explicar la emergencia de la vida en las sustancias químicas no vivientes. Las series autocatalíticas también dan origen a una interesante forma

no darwiniana de la evolución adaptativa. Esta evolución solamente consiste en un cambio de concentración de las especies químicas. A veces las viejas especies químicas se extinguen y desaparecen de la serie, y a veces emergen nuevas especies químicas y su concentración aumenta. Este modelo genera el orden de manera “gratuita”, porque la autocatálisis de las redes químicas que son lo suficientemente grandes se garantiza virtualmente con base en la estadística. Puesto que los sistemas colectivamente autocatalíticos de Kauffman pueden evolucionar, aunque carezcan de macromoléculas, Kauffman se permite cuestionar la famosa afirmación de Schrödinger (véase el capítulo iv) de que la vida requiere una macromolécula que funcione como genoma. (Burian y Richardson explican y evalúan muchos de los argumentos centrales de Kauffman.)²¹

En el capítulo xxxi el filósofo y científico de la vida artificial Mark Bedeau propone lo que él llama una “definición” de la vida, pero es claro que esta definición no se relaciona con el significado de la palabra “vida” o con el análisis de una concepción actual de la vida que haya sido propuesta por alguien. La definición de Bedau pretende ser el meollo de una teoría general de la vida, una definición que se puede adoptar a fin de unificar y explicar el fenómeno medular de la vida. Bedau alega que una definición final de la vida sólo puede ser la consecuencia de una teoría de la vida totalmente correcta. Si bien algunos filósofos y científicos (por ejemplo, Cleland y Chyba) piensan que carecemos de suficientes datos comprobables para construir teorías de la vida útiles, Bedau cree que proponer y poner a prueba hoy en día hipótesis concretas ayudará a acelerar nuestra comprensión de la vida. Aunque podemos esperar que en el futuro se demuestre la falsedad de cualquiera de las teorías que hoy formulemos, aun así las propuestas actuales nos pueden ayudar en la búsqueda de mejores teorías.²²

La teoría de la vida como adaptación flexible tiene en común con la teoría darwiniana de Dawkins que se expone en el capítulo xxix una orientación general evolucionista, pero en los detalles ambas son bastante diferentes. La propuesta medular de Bedau es que la vida, al menos en su forma primigenia, es un proceso evolutivo de adaptación flexible indefinidamente creativo. La adaptación flexible implica la selección natural, pero en otro ensayo Bedau cuestiona las conclusiones de Dawkins, quien dice que la selección natural explica suficiente-

²¹ R. M. Burian y R. C. Richardson, “Form and Order in Evolutionary Biology”, en A. Fine, M. Forbes y L. Wessels (comps.), *PSA 1990: Proceedings of the 1990 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association II*, Philosophy of Science Association, 1991, pp. 267-287. Reproducido, con correcciones menores, en M. Boden (comp.), *op. cit.*, pp. 146-172.

²² W. C. Wimsatt, “False Models as Means to Truer Theories”, en M. Nitecki y A. Hoffman (comps.), *Neutral Models in Biology*, Oxford University Press, Oxford, 1987, pp. 23-55.

mente la complejidad adaptativa de la vida; Bedau, por su parte, concluye que la adaptación flexible, además de la selección natural, implica otros procesos creativos globales. Bedau tentativamente propone que veamos el proceso de la adaptación flexible como la forma *primigenia* que asumió la vida, basándose en que este proceso proporciona una explicación natural y convincente de las propiedades y enigmas principales de la vida. En esta teoría, los organismos individuales representan formas genuinas de vida, pero como productos *secundarios* del proceso primigenio de la adaptación flexible. La teoría de la vida como adaptación flexible no explica el fenómeno de la vida mediante el enfoque en los organismos individuales, sino más bien en la red interconectada de organismos que se adapta a un medio ambiente dado. Esta propuesta es holística, al igual que la perspectiva gaiana de Margulis y Sagan, y su holismo ampara a Bedau de los problemas tradicionales asociados con las explicaciones de la vida centradas en la evolución, tales como el de los organismos, por ejemplo las mulas, que no tienen la capacidad de la reproducción. Puesto que las mulas son componentes naturales secundarios en el proceso más amplio de la adaptación flexible, se las puede calificar de formas secundarias de la vida, junto con los organismos que se reproducen activamente.

Si bien en muchos de los capítulos de este libro sus autores discuten las “teorías” de la vida, a veces no resulta claro lo que éstas supuestamente deben explicar. La tesis metodológica central en el capítulo de Bedau es que las teorías de la vida se deberían juzgar por cómo explican las propiedades y los enigmas principales de la vida, es decir, en el hecho de que los expliquen o no de manera convincente; Lange también adopta este punto de vista en el capítulo xvii de la tercera parte. El ensayo de Bedau ilustra esta tesis metodológica, mostrando la forma en que la teoría de la vida como adaptación flexible explica cuatro enigmas específicos de la vida: *a)* si se relacionan o no entre sí las diferentes formas de vida en diferentes niveles jerárquicos; *b)* si la distinción entre la vida y la no vida representa o no una dicotomía o una gradación; *c)* si la naturaleza de la vida se relaciona o no con su composición material o con su forma, y *d)* si la vida y la mente están o no intrínsecamente relacionados. Bedau piensa que su planteamiento constituye la herramienta más útil para evaluar todas las teorías de la vida generales, incluidas las que han sido propuestas por los filósofos (como Ruiz-Mirazo y sus colegas) o por los científicos (como Dawkins y Kauffman), así como las explicaciones composicionales de Pace (capítulo xi) y de Benner y sus colegas (capítulo xii), y los planteamientos basados en la célula química mínima de Deamer (capítulo xx), Luisi y sus colegas (capítulo xxi) y Gánti (capítulo vii). Debe seña-

larse, sin embargo, que el planteamiento metodológico de Bedau no se vincula con una determinada serie de propiedades principales. Como dice Bedau, es posible evaluar las teorías de la vida por su acierto en explicar las propiedades principales de la vida, sean cuales fueren estas propiedades.

BIBLIOGRAFÍA

- Beatty, J., "The Evolutionary Contingency Thesis", en G. Wolters y J. G. Lennox (comps.), *Concepts, Theories, and Rationality in the Biological Sciences*, University of Pittsburg Press, Pittsburg, 1995.
- Bedau, M. A., "The Evolution of Complexity", en A. Barberousse, M. Morange y T. Pradeu (comps.), *Mapping the Future of Biology: Evolving Concepts and Theories*, Springer, Berlín, 2009, pp. 111-131.
- , "The Nature of Life", en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Nueva York, 1996.
- Bird, A., y E. Tobin, "Natural Kinds", en E. N. Zalta (comp.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, edición de la primavera de 2009. Disponible en <<http://plato.stanford.edu/archives/spr2009/entries/natural-kinds>>.
- Burian, R. M., y R. C. Richardson, "Form and Order in Evolutionary Biology", en A. Fine, M. Forbes y L. Wessels (comps.), *PSA 1990: Proceedings of the 1990 Biennial Meeting of the Philosophy of Science Association II*, Philosophy of Science Association, 1991, pp. 267-287 (Reproducido, con correcciones menores, en M. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Nueva York, 1996, pp. 146-172).
- Cartwright, N., *How the Laws of Physics Lie*, Oxford University Press, Oxford, 1983.
- Cleland, C. E., *The Quest for a Universal Theory of Life: Searching for Life as We Don't Know It*, Cambridge University Press, Cambridge, en prensa.
- , "Understanding the Nature of Life: A Matter of Definition or Theory?", en J. Seckbach (comp.), *Life as We Know It*, Springer, Dordrecht, 2006, pp. 589-600.
- Gould, S. J., *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History*, W. W. Norton & Company, Nueva York, 1989. [Versión en español: *La vida maravillosa: Burgess Shale y la naturaleza de la historia*, trad. de Joandomenec Ros, Crítica, Barcelona, 2008.]
- Harré, R., "Laws of Nature", en W. H. Newton-Smith (comp.), *A Companion to the Philosophy of Science*, Blackwell Publishing, Oxford, 2000.
- Joyce, G. F., "Foreword", en D. W. Deamer, y G. R. Fleischaker (comps.), *Origins of Life: The Central Concepts*, Jones & Bartlett, Boston, 1994, pp. ix-xii.

- Kauffman, S. A., *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-organization and Complexity*, Oxford University Press, Nueva York, 1995.
- , *The Origins of Order: Self-organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, Nueva York, 1993.
- Korzeniewski, B., “Cybernetic Formulation of the Definition of Life”, *Journal of Theoretical Biology*, 209: 275-286, 2001.
- Kripke, S. A., *Naming and Necessity*, Harvard University Press, Cambridge, 1972.
- Lovelock, J. E., *Gaia: A New Look at Life on Earth*, Oxford University Press, 1979.
- Margulis, L., *Symbiosis in Cell Evolution*, Freeman, Nueva York, 1981.
- Maturana, H. R., y F. J. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, D. Reidel, Dordrecht, 1980. [Versión en español: *De máquinas y seres vivos. Autopoiesis: la organización de lo vivo*, Editorial Universitaria, Santiago de Chile, 2006.]
- Mitchell, S. D., “*Ceteris Paribus*: An Inadequate Representation for Biological Contingency”, *Erkenntnis*, 57: 329-350, 2002.
- Psillos, S., *Scientific Realism: How Science Tracks the Truth*, Routledge, Londres, 1999.
- Putnam, H., “Explanation and Reference”, en R. J. Pearce y P. Maynard (comps.), *Conceptual Change*, D. Reidel, Dordrecht, 1973, pp. 199-221.
- , “The Meaning of ‘Meaning’”, en K. Gunderson (comp.), *Language, Mind, and Knowledge*, University of Minneapolis, Minneapolis, 1975, pp. 215-271.
- Wimsatt, W. C., “False Models as Means to Truer Theories”, en M. Niteckiand y A. Hoffman (comps.), *Neutral Models in Biology*, Oxford University Press, Oxford, 1987, pp. 23-55.

Carl Sagan

XXIII. DEFINICIONES DE LA VIDA*

MUCHO SE sabe sobre la vida. Los anatomistas y los taxonomistas han estudiado las formas y las relaciones de más de un millón de distintas especies de plantas y animales. Los fisiólogos han investigado el funcionamiento general de los organismos. Los bioquímicos han sondeado las interacciones biológicas de las moléculas orgánicas que constituyen la vida en nuestro planeta. Los biólogos moleculares han descubierto las moléculas mismas que son responsables de la reproducción y de la transmisión de la información hereditaria de generación en generación, cuestión que los genetistas ya habían estudiado anteriormente sin llegar al nivel molecular. Los ecólogos han indagado las relaciones entre los organismos y su medio ambiente; los etólogos, el comportamiento de los animales y las plantas; los embriólogos, el desarrollo de los organismos complejos a partir de una sola célula; los biólogos evolucionistas, la emergencia de los organismos en el curso del tiempo geológico. Sin embargo, a pesar del enorme acopio de datos que cada una de estas especialidades biológicas ha proporcionado, resulta notable que no exista un acuerdo sobre lo que se estudia. No hay una definición de la vida que se haya aceptado de manera general. De hecho, es posible discernir en cada especialidad biológica cierta tendencia a definir la vida según su particular perspectiva. También las personas comunes tienden a definirla según su particular óptica. Por ejemplo, un hombre de la calle a quien se le pregunte sobre la vida en otros planetas, con frecuencia imagina una vida de tipo distintivamente humano. Muchos individuos creen que los insectos no son animales, puesto que por “animales” ellos entienden “mamíferos”. El hombre tiende a definir las cosas con base en lo que le resulta familiar. Pero las verdades fundamentales acaso no sean familiares. De las siguientes definiciones, las primeras dos utilizan términos que en la vida cotidiana son familiares; las siguientes tres se basan en conceptos y marcos teóricos más abstractos.

* Este capítulo apareció originalmente como la primera sección del artículo “Life” de la *Encyclopædia Britannica*, Encyclopædia Britannica Incorporated, Chicago, 1970, pp. 1083-1083A. Reproducido con el permiso de Encyclopædia Britannica, © 1970, para Encyclopædia Britannica, Inc.

FISIOLÓGICA

La definición fisiológica de la vida fue popular durante muchos años. Se definió la vida como un sistema capaz de realizar cierto número de funciones, tales como comer, metabolizar, excretar, respirar, moverse, crecer, reproducirse y responder a estímulos externos. Pero muchas de estas funciones pueden existir en máquinas que nadie calificaría de vivas, o pueden no existir en organismos que todo el mundo calificaría de vivientes. Por ejemplo, se puede decir de un automóvil que éste come, metaboliza, excreta, respira; que se mueve y que responde a los estímulos externos. Y un visitante de otro planeta, viendo la enorme cantidad de automóviles en la Tierra y la manera en que las ciudades y paisajes han sido diseñados en beneficio de los vehículos motorizados, bien podría pensar que los autos no sólo están vivos, sino que son la forma de vida predominante en el planeta. El hombre, sin embargo, se precia de saber que no es así. Por otra parte, algunas bacterias no respiran en absoluto, sino que a lo largo de su vida lo que hacen es alterar el estado de oxidación del azufre.

METABÓLICA

La definición metabólica sigue siendo popular entre muchos biólogos. Describe un sistema viviente como un objeto definitivamente delimitado que continuamente intercambia algunas de sus sustancias con su entorno, aunque sin alterar sus propiedades generales, al menos a través de un cierto periodo de tiempo. Pero aquí también hay excepciones. Hay semillas y esporas que permanecen, hasta donde se puede saber, en un estado de perfecta latencia y sin ninguna actividad metabólica en absoluto a temperaturas muy bajas durante cientos, acaso miles de años, pero que pueden revivir perfectamente en condiciones más benévolas. Una llama, como la de una vela en una habitación cerrada, con una forma perfectamente definida y delimitada, se mantiene mediante la combinación de las ceras orgánicas con el oxígeno molecular, produciendo bióxido de carbono y agua. Por cierto, una reacción química de un tipo muy similar es fundamental en la mayoría de los animales de la Tierra. Las llamas también tienen la bien conocida capacidad de crecer.

BIOQUÍMICA

La definición bioquímica o molecular ve los organismos vivos como sistemas que contienen información hereditaria que es reproducible y está codificada en las moléculas del ácido nucleico, organismos que realizan el metabolismo controlando las reacciones químicas y utilizando los catalizadores proteínicos que se conocen como enzimas. En muchos aspectos, esta definición es más satisfactoria que cualquiera de las definiciones fisiológicas o metabólicas de la vida. Sin embargo, incluso en ésta hay asomos de contraejemplos. Al parecer existen algunas pruebas de que un agente de tipo viral, el llamado *scrapie*, no contiene en absoluto ácidos nucleicos, aunque se supone que los ácidos nucleicos del animal huésped se involucran en la reproducción del *scrapie*. Además, una definición estrictamente química resulta peculiarmente inconsistente. Si el hombre fuera capaz de construir un sistema que tuviera todas las propiedades funcionales de la vida, no sería un sistema vivo, según esta definición, si careciera de las moléculas de que están hechos los biólogos terráneos —y que son sus preferidas—.

GENÉTICA

Todos los organismos en la Tierra, desde la célula más sencilla al hombre mismo, son máquinas con poderes extraordinarios que realizan fluidamente intrincadas transformaciones de moléculas orgánicas, que muestran complejos patrones de comportamiento, y que construyen indefinidamente a partir de materias primas del medio ambiente copias más o menos idénticas de sí mismas. ¿Cómo pudieron haber surgido máquinas de una complejidad tan asombrosa y de una belleza tan deslumbrante? La respuesta, para la cual existen hoy en día excelentes evidencias científicas, se discernió primero por Charles Darwin en los años anteriores a la publicación en 1859 de una obra suya que hizo época: *El origen de las especies*. La siguiente es una formulación moderna de su teoría de la selección natural: la información hereditaria se halla en moléculas grandes conocidas como genes, en parte compuestas por ácidos nucleicos. Genes distintos son responsables de la expresión de diferentes características del organismo. Durante la reproducción del organismo los genes también se reproducen, o replican, entregando las instrucciones respecto a las diversas características a la siguiente generación. Pueden darse ocasionalmente ciertas imperfecciones, llamadas mutaciones, en la replica-

ción de los genes. Una mutación altera las instrucciones para una característica o unas características en particular. También sigue reproduciéndose sin alteraciones, en el sentido de que su capacidad para determinar una característica dada en el organismo permanece intacta a lo largo de las generaciones, hasta que el gen mutado mismo experimenta una mutación. Algunas mutaciones, una vez que se expresan, producirán características favorables en el organismo; los organismos que posean estos genes favorables se reproducirán con preferencia sobre los organismos sin estos genes. Sin embargo, la mayoría de las mutaciones suelen ser perjudiciales y con frecuencia producen una discapacidad, o causan la muerte del organismo. Como ejemplo, es poco probable que uno pueda mejorar el funcionamiento de un reloj fino dejándolo caer desde un edificio alto. El reloj podría funcionar mejor, pero esto sería muy improbable. En los organismos, que están mucho mejor hechos que el reloj más fino, cualquier cambio aleatorio resultaría mucho más perjudicial. Pero ocasionalmente ocurre un cambio fortuito, beneficioso y heredable, que da por resultado un organismo mejor adaptado a su medio ambiente. De esta manera los organismos evolucionan lentamente hacia una mejor adaptación y, en la mayoría de los casos, hacia una complejidad mayor. Semejante evolución, sin embargo, se produce a un costo enorme; si el hombre existe hoy como un ser complejo y razonablemente bien adaptado, es sólo en virtud de la muerte de miles de millones de organismos ligeramente menos adaptados y algo menos complejos. En dos palabras, la teoría darwiniana de la selección natural afirma que los organismos complejos se desarrollaron, o evolucionaron, a través del tiempo, gracias a la replicación, la mutación y la replicación de las mutaciones. Por lo tanto, una definición de la vida sería que ésta es un sistema capaz de evolucionar mediante la selección natural.

Esta definición pone gran énfasis en la importancia de la replicación. Es verdad que en cualquier organismo un enorme esfuerzo biológico se invierte en la replicación, aunque ésta no le confiera un beneficio patente al organismo replicador. Algunos organismos, por ejemplo, muchos híbridos, no se replican. Pero sus células sí lo hacen. También es verdad que la vida, tal como se ha definido, no descarta la duplicación sintética. Debería ser posible construir una máquina que fuera capaz de producir copias idénticas de sí misma a partir de componentes diseminados por doquier en el entorno, pero que formara sus descendientes de una manera ligeramente diferente cuando se diera un cambio aleatorio en sus instrucciones. Una máquina así desde luego también replicaría sus instrucciones. El hecho de que semejante máquina cumpliría con los requerimientos de la definición genética de la vida no es un argumento contra tal definición; de hecho, si

los componentes fueran lo suficientemente sencillos, la máquina tendría la capacidad de evolucionar, formando sistemas muy complejos que probablemente tendrían todas las demás propiedades que se les atribuyen a los sistemas vivientes. La definición genética tiene la ventaja adicional de estar formulada en términos puramente funcionales. No depende de que se opte por una serie de moléculas constituyentes en particular. Es enorme la improbabilidad —explicada detalladamente más adelante— de la existencia de organismos contemporáneos; éstos no podrían haber surgido gracias a procesos puramente aleatorios y sin continuidad histórica. En la definición genética de la vida es fundamental el convencimiento de que no es posible alcanzar cierto nivel de complejidad sin la selección natural.

TERMODINÁMICA

La termodinámica distingue entre los sistemas abiertos y los sistemas cerrados. Un sistema cerrado se encuentra aislado en su medio ambiente y no intercambia ni luz ni calor ni sustancias con su entorno. En un sistema abierto sí ocurren estos intercambios. La segunda ley de la termodinámica afirma que en un sistema cerrado no pueden darse procesos que incrementen el orden neto (o que disminuyan la entropía neta) del sistema. Por lo tanto, el universo tomado como un todo avanza inexorablemente hacia un estado de total aleatoriedad y carece de cualquier tipo de orden, patrón o belleza. Desde el siglo XIX se ha calificado de “muerte por calor” a este destino del universo. Pero los organismos vivientes sí poseen un orden patente y a primera vista parecen contradecir la segunda ley de la termodinámica. Los sistemas vivientes por tanto podrían definirse como regiones localizadas en que hay un incremento continuo del orden. Sin embargo, los “sistemas vivientes” en realidad no contradicen la segunda ley. Incrementan su orden a expensas de la mayor disminución del orden del universo externo. Los sistemas vivientes no están cerrados, sino más bien abiertos. La mayor parte de la vida en la Tierra, por ejemplo, depende del flujo de la luz solar, utilizada por las plantas para construir moléculas complejas con base en moléculas sencillas. Pero el orden resultante aquí en la Tierra se compensa sobradamente con la disminución del orden en el Sol, mediante los procesos termodinámicos que son responsables de la radiación solar.

H. Morowitz ha argumentado, sobre la base de la termodinámica general de los sistemas abiertos, que el orden de un sistema aumenta cuando a través de él pasa la energía, y además que tal cosa ocurre mediante el desarrollo de ciclos. En

la Tierra, el ciclo del carbono es un ciclo biológico sencillo. El carbono proveniente del bióxido de carbono atmosférico se incorpora en las plantas y se convierte en carbohidratos mediante el proceso de la fotosíntesis. Estos carbohidratos finalmente se oxidan, tanto por las plantas como por los por animales, a fin de extraer la energía útil encerrada en sus enlaces químicos. En la oxidación de los carbohidratos, el bióxido de carbono se devuelve a la atmósfera, completando así el ciclo. Morowitz cree que procesos muy similares se desarrollan espontáneamente en ausencia de vida mediante el flujo de energía a través de un sistema químico. Desde este punto de vista, los ciclos biológicos son meramente una explotación por los sistemas vivientes de aquellos ciclos termodinámicos preexistentes, anteriores a la vida. No se sabe si los procesos termodinámicos de los sistemas abiertos son capaces, cuando no existe la replicación, de producir el tipo de complejidad que caracteriza a los sistemas biológicos. Es claro, sin embargo, que la complejidad de la vida en la Tierra ha surgido mediante la replicación, aunque ciertamente se han utilizado vías termodinámicamente favorables.

RESUMEN

La existencia de estas cinco definiciones de la vida diferentes seguramente significa que la vida es una cosa compleja. Se conoce desde la segunda mitad del siglo XIX el funcionamiento fundamental de los sistemas biológicos. Pero la diversidad de las definiciones sugiere algo más. Como se explica más adelante, todos los organismos de la Tierra están íntimamente relacionados, a pesar de sus diferencias superficiales. El patrón fundamental, tanto de la forma como de la materia, de toda la vida en la Tierra es esencialmente idéntico. Como se verá más adelante, tal identidad probablemente implica que todos los organismos en la Tierra han evolucionado a partir de un solo origen de la vida. Resulta difícil generalizar a partir de tan sólo un ejemplo; por ende, el biólogo se encuentra fundamentalmente en desventaja en relación con, digamos, el químico o el físico o el meteorólogo, quienes hoy pueden estudiar ciertos aspectos de su disciplina en lugares que se encuentran más allá de la Tierra. Si en verdad sólo existe un tipo de vida en la Tierra, entonces se carece de una perspectiva fundamental. No se sabe cuáles son los aspectos de los sistemas vivientes que sean necesarios, en el sentido de que todos los sistemas vivientes, dondequiera que se encuentren, deban poseerlos; no se sabe cuáles aspectos de los sistemas vivientes son contingentes, en el sentido de que sean el resultado de un accidente evolutivo, de manera que, en algún otro

lugar del universo, una secuencia distinta de sucesos pueda haber producido características diferentes. Por lo tanto, la obtención de incluso un solo ejemplo de vida extraterrestre, sin importar cuán elemental sea su forma o sustancia, representaría una revolución fundamental en la biología. No se sabe si hay un extenso abanico de temas y contrapuntos biológicos en el universo, si existen lugares que poseen fugas musicales, en comparación con las cuales nuestra melodía resulta algo simplona y atiplada. O acaso nuestra melodía es la única que existe. Consecuentemente, la posibilidad de la existencia de la vida en otros planetas debe tomarse en cuenta en cualquier discusión general de la vida.

Daniel E. Koshland

XXIV. LOS SIETE PILARES DE LA VIDA*

¿CUÁL ES la definición de la vida? Recuerdo una conferencia de la élite científica que pretendió responder esta pregunta. ¿Tiene vida una enzima? ¿Tiene vida un virus? ¿Tiene vida una célula? Tras lanzar durante muchas horas globos promisorios que definían la vida con una frase, seguidas de las igualmente terminantes pinchaduras de los globos, se llegó a una aparente solución: “La capacidad para reproducirse: ésta es la característica esencial de la vida”, dijo un potentado de la ciencia. Todo el mundo asintió con la cabeza, aceptando que la esencia de la vida era la capacidad para reproducirse, hasta que se hizo escuchar una modesta voz. “Entonces un conejo solo no tiene vida. Dos conejos —un macho y una hembra— tienen vida, pero cualquiera de los dos por sí mismo no la tiene.” Desde ese momento todos estuvimos convencidos de que si bien todo el mundo sabe lo que es la vida, simplemente no hay una definición sencilla de la vida.

Si yo estuviera obligado a aventurarme temerariamente en los terrenos que los ángeles temen hollar, yo propondría que “un organismo viviente es una unidad organizada que puede desempeñar reacciones metabólicas, que puede defenderse contra los daños, que puede responder a los estímulos, y que tiene la capacidad de ser por lo menos uno de los miembros de una pareja reproductora”. Pero no me hace feliz esta breve definición. No obstante, si se me permitiera reflexionar más dilatadamente, diría que es posible definir los pilares fundamentales en que se basa la vida como la conocemos. Por “pilares” entiendo los principios esenciales —termodinámicos y cinéticos— gracias a los cuales opera un sistema viviente. El actual interés en el descubrimiento de la vida en otras galaxias y en la reproducción de la vida mediante sistemas artificiales, indica que sería deseable elucidar esos pilares. En este capítulo examinaré los mecanismos singulares mediante los cuales esos principios se implementan en la vida de la Tierra, aunque reservándome el derecho de sugerir que puede haber otros mecanismos para la implementación de los principios. Si yo me encontrara en la antigua Grecia, crea-

* Este capítulo apareció originalmente en *Science*, 295 (22): 2215-2216, 2002.

ría una diosa de la vida que llamaría PICERAS, por razones que serán claras más adelante.

El primer pilar de la vida es un Programa. Por programa entiendo un plan organizado que describe tanto los ingredientes mismos como la cinética de las interacciones entre los ingredientes durante la permanencia del sistema. En los sistemas vivientes de la Tierra, este programa se implementa por el ADN que codifica los genes de los organismos terráqueos y que se replica de generación en generación con cambios pequeños, pero siempre dejando intacto el plan general. Los genes a su vez codifican las sustancias químicas —las proteínas, los ácidos nucleicos, etc.— que llevan a cabo las reacciones en los sistemas vivientes. Es en el ADN donde se compendia y mantiene el programa de la vida en la Tierra.

El segundo pilar de la vida es la Improvisación. Puesto que un sistema viviente inevitablemente constituye tan sólo una pequeña fracción del universo en que vive, no tiene la capacidad de controlar todos los cambios y vicisitudes del medio ambiente, por lo que debe poder modificar de algún modo su programa. Si, por ejemplo, un periodo caluroso se transforma en una edad de hielo, reduciendo la eficacia del programa, a fin de sobrevivir el sistema tendrá que cambiar su programa. En los sistemas vivientes actuales, tales cambios se pueden lograr mediante un proceso de mutación más selección que permite a los programas optimizarse a fin de enfrentar los nuevos retos ambientales.

El tercer pilar de la vida es la Compartimentación. Todos los organismos que consideramos vivientes poseen un volumen circunscrito rodeado de una superficie, la membrana o piel que guarda los ingredientes dentro de un volumen delimitado y que protege contra las sustancias químicas perjudiciales —tóxicas o diluyentes— del exterior. Además, los organismos al crecer se dividen en los compartimentos menores que llamamos células (u órganos, es decir, grupos de células), a fin de centralizar y especializar ciertas funciones dentro del organismo. La compartimentación se debe al hecho de que la vida depende de la cinética de las reacciones entre los ingredientes, sustratos y catalizadores (enzimas) del sistema viviente. La cinética depende de las concentraciones de los ingredientes. La simple dilución de las sustancias químicas que contenga una célula la mata por la disminución en la concentración de éstas, aunque todas sigan tan activas como antes de ser diluidas. De manera que es esencial un contenedor para mantener las concentraciones y el ordenamiento interno del organismo viviente, y para proporcionar una protección contra las influencias externas.

El cuarto pilar de la vida es la Energía. La vida que conocemos implica el movimiento —de las sustancias químicas, del cuerpo, de los componentes del cuer-

po— y un sistema que se mueve no puede permanecer en equilibrio. Tiene que ser un sistema abierto y, en este caso, metabólico. Dentro de la célula tienen lugar muchas reacciones químicas, y desde el exterior se introducen en ella moléculas — O_2 , CO_2 , nutrientes, etc.—. El sistema del organismo es parsimonioso; muchas de las sustancias químicas se reciclan numerosas veces durante la vida de un organismo (por ejemplo, la fotosíntesis consume el CO_2 que luego se regenera por oxidación en el sistema), pero las sustancias ingresan originalmente en el sistema viviente desde el exterior, razón por la cual la termodinámica lo denomina sistema abierto. En virtud de las numerosas reacciones y del hecho de que se produce una ganancia de entropía (la analogía mecánica sería la fricción), tiene que haber una compensación para mantener el sistema en funcionamiento y ésta requiere una fuente continua de energía. La principal fuente de energía en la biosfera de la Tierra es el Sol —aunque la vida en la Tierra obtiene un poco de energía de otras fuentes, tales como el calor interno de la Tierra—. El sistema puede seguir manteniéndose indefinidamente mediante el astuto reciclaje de las sustancias químicas, siempre que obtenga la energía suplementaria del Sol para compensar los cambios en su entropía.

El quinto pilar es la Regeneración. Ya que un sistema metabólico, compuesto de catalizadores (enzimas) y sustancias químicas (metabolitos) dentro de un contenedor, se halla en constante reactividad, inevitablemente experimenta algunas pérdidas termodinámicas. Puesto que estas pérdidas a la larga producen cambios adversos en la cinética del programa, tiene que haber un plan para compensar las pérdidas, es decir, un sistema de regeneración. Un sistema regenerador de este tipo es la difusión o ingreso activo de sustancias químicas en el organismo viviente. Por ejemplo, el CO_2 y sus productos reponen las pérdidas inevitables por las reacciones químicas. Otro sistema regenerador es la constante renovación sintética de los componentes del sistema viviente que están sujetos al desgaste. Por ejemplo, el músculo cardíaco de un humano normal late 60 veces al minuto —3 600 veces cada hora, 1 314 000 veces al año, 91 980 000 veces durante toda la vida—. No se ha descubierto ningún material hecho por el hombre que no se fatigue y colapse con tanto uso, razón por la cual el tiempo de utilización de los corazones artificiales es tan breve. Los sistemas vivientes, sin embargo, continuamente sintetizan y renuevan las proteínas de su músculo cardíaco y las reemplazan a medida que se degradan; el cuerpo hace lo mismo con otros componentes —los sacos pulmonares, las proteínas renales, las sinapsis neuronales, etcétera—.

El sexto pilar es la Adaptabilidad. La improvisación es una forma de adaptabilidad, pero es demasiado lenta para muchos de los peligros y accidentes am-

bientales que un organismo viviente debe enfrentar continuamente. Por ejemplo, un humano que mete su mano en el fuego pasa por una experiencia dolorosa que la evolución podría seleccionar en contra —pero el individuo tiene que retirar su mano del fuego inmediatamente si quiere vivir apropiadamente a partir de entonces—. La respuesta conductual al dolor es esencial para la supervivencia y es una respuesta fundamental de los sistemas vivientes que llamamos retroalimentación. Nuestro cuerpo responde al agotamiento de los nutrientes (provisiones de energía) con el hambre, la cual nos obliga a buscar nuevos alimentos, y luego la retroalimentación nos impide ingerir un exceso de nutrientes (es decir, más allá de la saciedad), ya que perderíamos el apetito y comeríamos menos. Caminar descalzo largos trechos produce callos en los pies o nos obliga a adquirir zapatos para protegerlos. Estas manifestaciones de la adaptabilidad representan el desarrollo de las respuestas de la retroalimentación [*feedback*] y de la posalimentación [*feed-forward*] en el nivel molecular, que son las respuestas de los sistemas vivientes que permiten la supervivencia en los medios que cambian rápidamente. La adaptabilidad posiblemente podría incluir la improvisación (el pilar número 2), pero la improvisación es un mecanismo que modifica el programa fundamental, mientras que la adaptabilidad (el pilar número 6) es una respuesta conductual que forma parte del programa. Así como en nuestro sistema terráqueo dos mecanismos distintos se encargan de estas dos necesidades, yo creo que en cualquier nuevo sistema, ya sea construido o descubierto por nosotros, estas necesidades serán conceptos diferentes de los cuales se encargarán mecanismos diferentes.

Finalmente, y lejos de ser el menos importante, está el séptimo pilar, la Separación [el Aislamiento]. En este contexto, por aislamiento entiendo algo así como la privacidad en el mundo social de nuestro universo. En un sistema metabólico donde muchas reacciones tienen lugar al mismo tiempo, es esencial impedir que las sustancias químicas en la vía 1 (por ejemplo, $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D$) se metabolicen por los catalizadores de la vía 2 ($R \rightarrow S \rightarrow T \rightarrow U$). Nuestro sistema viviente lo logra gracias a una propiedad crucial de la vida: la especificidad de las enzimas que sólo procesan las moléculas para las que fueron diseñadas y que no se confunden al encontrar moléculas distintas provenientes de otras vías. En cierto sentido esta propiedad se podría comparar con el material aislante de un cable eléctrico que le impide a éste hacer corto circuito al entrar en contacto con otro cable. El aislamiento de un sistema biológico no es absoluto. Puede ser interrumpido por los mensajes de la retroalimentación y la posalimentación, pero el sistema sólo puede recibir los mensajes específicamente ordenados. También existe la especificidad en las interacciones del ADN y el ARN. Este aislamiento de las vías es lo que

permite que ocurran con gran eficiencia miles de reacciones dentro de una diminuta célula viviente, y que simultáneamente el sistema pueda recibir selectivamente las señales que le permiten responder adecuadamente a los cambios ambientales.

Estos siete pilares de la vida —(P)rograma, (I)mprovisación, (C)ompartimentación, (E)nergía, (R)egeneración, (A)daptabilidad, (S)eparación, en una palabra, PICERAS—, son los principios fundamentales en que se basa un sistema viviente. Es posible deducir cómo la vida en la Tierra ha podido integrarlos en sí misma. Pero estos mecanismos acaso no son perfectos y acaso puedan mejorarse. Por ejemplo, el sistema regenerativo que la vida terráquea utiliza es imperfecto en cualquier individuo en particular, y por lo tanto requiere una “renovación”. A su vez, este mecanismo requiere un dispositivo para la herencia a fin de mantener la continuidad del programa en la generación sucesiva. Supongamos que las proteínas, hormonas y células tuvieran un mejor sistema de retroalimentación, a fin de que el gradual decaimiento que se da con la edad se corrigiera constantemente mediante la retroalimentación, entonces desaparecería la necesidad de una renovación. Esto eliminaría la muerte y las necesidades hereditarias del sistema viviente actual. También significaría que un individuo podría vivir para siempre sin envejecer. Sin embargo, tal cosa sería un problema, puesto que la renovación (la muerte y un nuevo nacimiento) proporciona la oportunidad para las improvisaciones (mutaciones en el ADN), y este pilar de la regeneración tendría que remplazarse con un nuevo mecanismo a fin de conseguir la misma ventaja.

Tales dilemas nos obligan a enfrentar otra realidad. En la actualidad la forma en que la mutación y la selección (la supervivencia de los más aptos) han funcionado en el largo curso de la evolución ya no parece aplicable al *Homo sapiens*. Hemos llegado a ser más compasivos, menos exigentes. Acaso un nuevo planteamiento —la prolongación de la vida y la deliberada modificación del programa por un consejo supremo de sabios salomónicos— podría sustituir el rudo proyecto de la supervivencia de los más fuertes. Yo no propongo la necesidad de un cambio tan drástico en el actual mecanismo de la improvisación que tan bien nos ha funcionado a través de los siglos, sino que simplemente señalo que es posible cambiar ciertos mecanismos en particular, siempre que mantengamos los pilares.

Esta lista de los siete fundamentos de la vida nos permite considerar de otra manera los objetivos y los planteamientos terapéuticos de las actuales investigaciones. El concepto de la adaptabilidad, por ejemplo, es ciertamente uno para el cual se podrían idear nuevos mecanismos, probablemente mediante el ajuste de los mecanismos vigentes a fin de que funcionen más eficazmente en los sistemas

vivientes reales. Por ejemplo, el ojo puede adaptarse a una gama de niveles de luz externa que abarca 10 órdenes de magnitud (10^{10}), mientras que los demás órganos del cuerpo humano son menos versátiles. Acaso sería posible mejorar otros órganos, como los pulmones, los riñones o el bazo, a fin de que pudieran funcionar a mayores concentraciones de las sustancias que regulan y que los perjudicaría menos el envejecimiento.

Así, los principios de PICERAS parecen ser necesarios para el funcionamiento de un sistema viviente. Los mecanismos para lograr un sistema semejante pueden ser diversos, siempre que satisfagan los requisitos termodinámicos y cinéticos. Tenemos un ejemplo, la vida en la Tierra, que nos muestra cómo se han podido integrar. Será interesante ver si un conjunto autónomo y coherente de mecanismos diferentes puede dar por resultado un modelo de la vida.

Kepa Ruiz-Mirazo, Juli Peretó
y Álvaro Moreno*

XXV. UNA DEFINICIÓN UNIVERSAL DE LA VIDA:
AUTONOMÍA Y EVOLUCIÓN ABIERTA**

INTRODUCCIÓN

Las definiciones de la vida son muy controvertidas. Esto no sólo se debe a la falta de consenso entre las diferentes propuestas hasta la fecha formuladas. Algunos autores se muestran muy escépticos sobre la posibilidad real de abarcar con “cualquier tipo de lenguaje científicamente pertinente” un fenómeno tan complejo y tan variado. Otros piensan que tenemos que esperar hasta que las teorías biológicas sean más rigurosas, más globales y significativas. Y todavía otros consideran que no vale la pena asumir el reto, ya que aun en el caso de que se pudiera lograr una definición adecuada de la vida, ésta no dejaría de ser bastante convencional y probablemente influiría poco en el desarrollo de programas de investigación biológica específicos.

La fenomenología de la vida en verdad muestra muchos aspectos diferentes (que aparecen en diversos niveles organizativos) y no resulta fácil englobarlos todos en un solo esquema conceptual. Esto se dificulta todavía más porque la vida tiene la capacidad de diversificarse y de explorar sus propios límites (siempre produciendo casos excepcionales que son otras tantas confirmaciones de la regla). Los impresionantes avances en la biología molecular que se dieron en el siglo pasado han revelado la gran armonía que subyace en todas las formas de vida, pero no queda claro hasta qué punto sea el resultado de la contingencia o de una auténtica necesidad; es decir, que si a partir de tal armonía se pueden establecer

* Este artículo fue presentado en el Encuentro ISSOL'02 que tuvo lugar del 30 de junio al 5 de julio en Oaxaca. Los autores están agradecidos con el doctor Jon Umerez por los muchos y muy útiles encuentros que tuvieron con él. Kepa Ruiz-Mirazo obtuvo una beca del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) de España, en el Centro de Astrobiología de Madrid, para la preparación y redacción de este artículo. El trabajo también recibió el apoyo de la Comisión Interministerial de Ciencia y Tecnología (CICYT) de España, subvención BMC2000-0764, y de la Universidad del País Vasco (UPV/EHU), subvención 9/upv 00003.230-17307/2001.

** Este artículo apareció originalmente en *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 34 (3): 323-346, 2004. Reproducido con la autorización de Springer+Business Media B. V.

principios biológicos generales o si ésta únicamente se deriva en efecto de que toda la vida terráquea descende de un solo ancestro universal. Además, ya que el problema del origen de la vida también está lejos de resolverse, no es para nada obvio cómo se relacionarían estos “principios biológicos” con las leyes generales de la física y la química, es decir, si estarían sujetos a una posible restricción de estas leyes o si habrían de tener su propio “estatus” como leyes científicas (con su propio potencial explicativo, su propio nivel de abstracción, etcétera).

Sin embargo, a pesar de estas dificultades, y de otras en las que podríamos pensar, también hay buenas razones para considerar que ahora es el momento de abordar la cuestión (como de hecho ciertos autores¹ lo están haciendo). Es verdad que no existe todavía una teoría general y cabal de la biología (cosa que han señalado Cleland y Chyba² para respaldar su escepticismo), pero las perspicaces investigaciones que se han realizado durante los últimos decenios en los dominios de la bioenergética, la enzimología o la genética, por ejemplo, nos han proporcionado un corpus de conocimientos lo suficientemente profundo y amplio como para intentar estructurarla en torno a algunos conceptos fundamentales “tentativamente universales”. Por sí mismo, este esfuerzo puede ser muy útil para el desarrollo de una biología general mejor estructurada. El poco éxito que han tenido las tentativas anteriores de definir la vida (en el sentido de que no han conducido al establecimiento de un consenso real) no tendría por qué desalentarnos, sobre todo tras haber visto que cierta confusión aún pudiera existir en el campo (véase el artículo sobre el tema que recientemente publicó Koshland en *Science*,³ así como nuestros comentarios críticos más adelante); tampoco tendría que desalentarnos el escepticismo de quienes no consideran posible o útil para la biología la tarea de definir la vida. No son concluyentes sus alegaciones basadas en la continuidad de los fenómenos fisicoquímicos y biológicos, o en la irreductibilidad/reductibilidad de la biología a la química y la física.

En este capítulo proponemos una definición concreta de la vida (la vida mínima y universal) con la intención de someterla a discusión. Nuestra propuesta no sólo pretende proporcionar cierta clarificación conceptual sobre este tema en particular, sino contribuir al progreso de otras líneas de investigación; por ejemplo, ciertos proyectos específicos en los campos del origen de la vida, la astrobiología o la vida artificial. En todo caso, el primer paso consiste en determinar qué

¹ G. Pályi, C. Zucchi y L. Caglioti, *Fundamentals of Life*, Elsevier, Nueva York, 2002.

² C. E. Cleland y C. F. Chyba, “Defining ‘Life’”, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 32: 387-393, 2002.

³ D. E. Koshland, “The Seven Pillars of Life”, *Science*, 295: 2215-2216, 2002. [Capítulo xxiv de esta edición.]

tipo de definición es el adecuado y, seguidamente, en exponer por qué nuestra propuesta significa un avance en relación con otras tentativas precedentes.

LOS REQUISITOS QUE DEBE SATISFACER UNA DEFINICIÓN DE LA VIDA

En términos generales, las definiciones tienen dos propósitos básicos: *i)* demarcar y clasificar un cierto tipo de fenómeno, y *ii)* establecer e, incluso, acaso explicar la naturaleza fundamental del fenómeno. El primero comúnmente produce definiciones *descriptivas* que consisten en una serie estipulada de propiedades que abarcan todo lo que se requiere para establecer si un fenómeno es o no de determinado tipo, mientras que el segundo implica una manera totalmente diferente de formular el problema: las definiciones *esencialistas* caracterizan un fenómeno dado con base en sus mecanismos dinámicos más fundamentales y en su organización esencial.

Diversas series de propiedades han sido propuestas en la literatura para distinguir entre “lo inerte” y “lo viviente”; por ejemplo, la autoorganización, el crecimiento, el desarrollo, la funcionalidad, el metabolismo, la adaptabilidad, la reproducción, la herencia y la propensión a la muerte (véanse entre otros, Mayr, Farmer y Belin, y los llamados “siete pilares” de C. de Duve).⁴ No obstante, ya que tales catálogos no proporcionan una jerarquía o una explicación que relacione las propiedades seleccionadas entre sí, es difícil determinar si cualquiera de las propuestas contiene precisamente las necesarias y suficientes (que ninguna de las propiedades se derive de las otras, lo cual conllevaría la redundancia, o se tenga que agregar a las demás, lo cual indicaría la ausencia de algo importante). Por añadidura, en la lista de las propiedades no hay indicio alguno que clarifique la fuente o el proceso de integración del sistema o fenómeno que se analiza, lo cual resulta crítico, ya que una definición de la vida que se suponga verdaderamente universal debería basarse en principios generales, ciertos de los cuales deberían originarse en la física y la química. En otras palabras, la definición tiene que incluir conceptos primigenios que nos ayuden a salvar el abismo entre los fenómenos fisicoquímicos y los biológicos. Ya lo había señalado Oparin diciendo que el

⁴ E. Mayr, *The Growth of Biological Thought*, Harvard University Press, Cambridge, Massachusetts, 1982; J. D. Farmer y A. Belin, “Artificial Life: The Coming Evolution”, en C. G. Langton, J. D. Taylor y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 815-838; C. de Duve, *Blueprint for a Cell: The Nature and Origin of Life*, Neil Patterson, Burlington, 1991, p. 9.

problema de la definición de la vida está estrechamente vinculado con el problema de su origen.⁵

Por lo tanto, nosotros intentaremos un tipo de definición esencialista que al mismo tiempo sea “genealógica”, en el sentido que explique —o por lo menos ilumine— el proceso que partiendo de determinadas condiciones constituya el fenómeno y por tanto ofrezca un marco natural para la generalización (es decir, la selección de los aspectos universales de toda la vida posible). De manera esquemática, la serie de requisitos que una definición tiene que satisfacer a fin de que tenga utilidad para el desarrollo de la biología actual, así como de otros campos de la investigación, se puede condensar en los siguientes puntos (en sentido amplio equivalentes a los de Emmeche):⁶

La definición deberá:

- a) ser plenamente coherente con los conocimientos actuales de la biología, la química y la física;
- b) evitar redundancias y contradicciones (ser autoconsecuente);
- c) poseer elegancia conceptual y profundo poder explicativo (es decir, proporcionar una mejor comprensión de la naturaleza de la vida, guiando nuestra búsqueda de sus orígenes y su subsecuente mantenimiento y desarrollo);
- d) ser universal (en el sentido que únicamente seleccione los aspectos necesarios de la vida, excluyendo los contingentes);
- e) ser mínima pero lo suficientemente específica (es decir, que deberá incluir tan sólo aquellos elementos que son comunes en todas las formas de vida, sin limitarse en principio a la vida en la Tierra, y al mismo tiempo plantear un claro criterio operativo respecto a la diferenciación entre la materia inanimada y la materia viviente, clarificando casos extremos, contribuyendo a la determinación de los biomarcadores, etcétera).

Sobre la base de estos señalamientos generales es que podemos evaluar la validez o utilidad de las diferentes propuestas. Por ejemplo, las listas no suelen satisfacer el punto (c) y por lo común tampoco el (b) (y, sucesivamente, el (d) y el (e)). Los planteamientos vitalistas pasan por alto el punto a. Por lo tanto, ya están “fuera de juego”. Examinemos con brevedad un ejemplo reciente, la propuesta de

⁵ A. I. Oparin, “The Nature of Life”, en A. I. Oparin, *Life: Its Nature, Origin and Development*, Academic Press, Nueva York, 1961, pp. 1-37.

⁶ C. Emmeche, *Defining Life as a Semiotic Phenomenon. Cibernet: Human Knowing*, Springer, Nueva York, 1998.

Koshland.⁷ Este autor propone una definición que no pretende ser una simple lista, pero que termina por mostrar ciertas debilidades muy similares a las señaladas. Su planteamiento de una serie de siete “principios” o “pilares” de la vida (el programa, la improvisación, la compartimentación, la energía, la regeneración, la adaptabilidad y el aislamiento)⁸ no es realmente satisfactorio: no sólo carece de elegancia y poder explicativo, sino que es patentemente redundante (varios de los “pilares” de Koshland se pueden incluir en el concepto de la “autopoiesis” que se verá más adelante y además muestran diferencias respecto a la tabla I que aparece en Margulis).⁹

Es obvio que es posible encontrar otras opciones en la literatura que se adecuan mejor al grupo de las definiciones esencialistas. Hay que resaltar aquí la definición biosemiótica de Emmeche:¹⁰ “La vida es la interpretación funcional de los signos en ‘sistemas codificadores’ autoorganizados que construyen sus propios ‘umwelts’”. Esta propuesta es ciertamente autoconsecuente y conceptualmente elegante (más aún si se examina la teoría biosemiótica), pero tiene un inconveniente importante: asume que los “signos” (es decir, la información) son de un tipo primigenio y natural, mientras que la física y la química no (éstas sólo admiten el tiempo, la materia, la energía, la carga, los campos...). Consecuentemente, aunque no contradice directamente el saber físicoquímico, no es compatible con él, y no cumple estrictamente con el requisito (a).

También vale la pena mencionar aquí la definición de Shapiro y Feinberg, según la cual la vida sería la actividad de una “biosfera”, es decir, la actividad de “un sistema de materia y energía extremadamente ordenado que se caracteriza por sus complejos ciclos, los cuales mantienen o incrementan gradualmente el orden del sistema mediante el intercambio de energía con el medio ambiente”.¹¹ Esta propuesta se formula en términos muy amplios y con la encomiable intención de acercar la biología a la física. No obstante, la aparente superioridad de esta formulación (particularmente en relación con los requisitos (a) y (d)) es defectuosa: ¿dónde está la especificidad del fenómeno de la vida? En el esquema,

⁷ D. E. Koshland, *op. cit.*

⁸ Comparar con los “siete pilares” de C. de Duve, *op. cit.*: la manufactura de los propios componentes, la extracción de la energía del medio ambiente, la catálisis, la transmisión de la información, el aislamiento, la regulación y la multiplicación.

⁹ Comparar con la tabla I que aparece en L. Margulis, “Big Trouble in Biology: Physiological Auto-poiesis versus Mechanistic Neo-Darwinism”, en J. Brockman (comp.), *Doing Science: The Reality Club 2*, Prentice Hall, Nueva York, 1990, pp. 211-235.

¹⁰ C. Emmeche, *op. cit.*

¹¹ R. Shapiro y G. Feinburg, “Possible Forms of Life in Environments very Different From the Earth”, en J. Leslie (comp.), *Physical Cosmology and Philosophy*, Macmillan, Nueva York, 1990, pp. 248-255.

¿dónde se encuentran las propiedades de la autoproducción, la reproducción, la adaptación, la herencia, la evolución selectiva..., que son tan características de los sistemas biológicos? La motivación de establecer un vínculo entre los dominios de lo inanimado y lo viviente no debería llevarnos a olvidar todo lo que realmente sabemos sobre la biología (¡o la química!). Un sistema cuya dinámica (los fenómenos de la autoorganización) tiene lugar en condiciones muy desequilibradas puede mantener o incrementar su orden de muchas maneras, pero los sistemas vivientes han desarrollado sus propias maneras y es por esta razón que son tan diferentes de todos los demás. Por tanto, la definición anterior no resulta adecuada, porque por lo menos debería indicar dónde hay que buscar la especificidad de la vida (es decir, que el requisito (*e*) no se cumple adecuadamente).

El problema es bastante delicado: no se puede esperar que todas las cuestiones biológicas importantes se expongan o destaquen en el breve espacio de una definición. Sin embargo, una buena definición debe estar bien equilibrada y contener las herramientas conceptuales clave que permitan desarrollar a partir de ella una teoría o esquema que sea coherente y que proporcione indicaciones lo suficientemente específicas como para posibilitar el establecimiento de un vínculo natural entre los reinos físicoquímico y biológico. En la siguiente sección habremos de examinar dos definiciones que se acercan más a lo que sería una definición ideal. Aunque puedan “mejorarse”, podemos decir que cumplen en sentido amplio con los estándares antes descritos. Y en todo caso la discusión de estas dos definiciones será de gran ayuda para introducir la nuestra posteriormente.

BREVE EXAMEN DE DOS DEFINICIONES SIGNIFICATIVAS

El concepto principal que se deriva de la sección anterior es que una adecuada definición de la vida no debería ser meramente descriptiva sino “esencialista-generacional”. En particular, hay que buscar definiciones que contengan un poder y una profundidad explicativos, es decir, que se apoyen en, o se relacionen con, un bien fundamentado marco conceptual de la fenomenología biológica. En esta línea, seleccionamos en la literatura dos propuestas importantes.

La definición estándar

“La vida es un sistema capaz de evolucionar mediante la selección natural”,¹² o, según una versión más elaborada y precisa: “La vida es un sistema químico autosustentable capaz de experimentar la evolución darwiniana (la “definición práctica” de la NASA)”.¹³

El concepto subyacente en esta definición es muy parecido al que se apoya en el paradigma neodarwiniano de la biología haciendo hincapié en la dinámica evolutiva de los sistemas biológicos. Según este concepto, las propiedades claves que un sistema debe tener a fin de evolucionar mediante la selección natural son “la reproducción, la variabilidad y la herencia”.¹⁴ En consecuencia, cualquier sistema que posea estas propiedades, incluso una población de moléculas replicadoras, bien podría satisfacer la definición.

Algunos autores, como Wicken,¹⁵ Brooks y Wiley,¹⁶ Luisi¹⁷ o Kauffman,¹⁸ cuestionan esta perspectiva alegando que una adecuada definición de la vida debe tomar en cuenta la forma característica en que los componentes de tal sistema se organizan como un conjunto coherente. La segunda versión de la definición parecería ser menos vulnerable a esta crítica, puesto que introduce la idea del “automantenimiento” (aparentemente ligado a la del metabolismo que se examina después). Sin embargo, la idea medular sigue siendo la misma. En palabras de Joyce,¹⁹ “aunque la noción de la evolución darwiniana supone los procesos de la autorreproducción, la continuidad material a lo largo de un linaje histórico, la diversidad genética y la selección natural [...], el automantenimiento [...] se relaciona con el hecho de que los sistemas vivientes contienen toda la información genética necesaria para su propia producción constante (es decir, el metabolismo)”.

¹² C. Sagan, s.v. “Life”, en *Encyclopædia Britannica*, William Benton, Londres, 1970. [Capítulo xxiii en esta edición.]

¹³ Véase también G. F. Joyce, “Foreword”, en D. W. Deamer y G. R. Fleischaker (comps.), *Origins of Life: The Central Concepts*, Jones & Bartlett, Boston, 1994, pp. ix-xii; P. L. Luisi, “About Various Definitions of Life”, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 28: 613-622, 1998.

¹⁴ R. C. Lewontin, “The Units of Selection”, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1: 1-18, 1979; M. Smith, *The Problems of Biology*, Oxford University Press, Oxford, 1986.

¹⁵ J. S. Wicken, *Evolution, Thermodynamics, and Information: Extending the Darwinian Program*, Oxford University Press, Oxford, 1987.

¹⁶ D. R. Books y E. O. Wiley, *Evolution as Entropy: Toward a Unified Theory of Biology*, The University of Chicago Press, Chicago, 1998.

¹⁷ P. L. Luisi, “About Various Definitions of Life”, *op. cit.*

¹⁸ S. A. Kauffman, “Autonomous Agents”, en S. A. Kauffman, *Investigations*, Oxford University Press, Oxford, 2000, pp. 49-80.

¹⁹ G. F. Joyce, *op. cit.*, p. 6.

La parcialidad genética es bastante obvia: aquí se entiende el metabolismo como el resultado de la adquisición de un *pool* de genes lo suficientemente completo como para que un sistema alcance una producción constante. Como Luisi²⁰ subraya, esta definición se creó a partir de una concepción de la vida que es fundamentalmente molecular, afín a un programa general de investigaciones que examina las raíces de la evolución darwiniana en el contexto de las poblaciones de moléculas replicadoras que experimentan cierta dinámica selectiva (por ejemplo, los modelos de las “cuasiespecies”, los “híperciclos”, etcétera).²¹

No obstante, como se verá en la siguiente definición, la noción del metabolismo es mucho más rica todavía. Involucra la organización material auto(re)productiva y funcionalmente integrada (es decir, irreductible a las propiedades de sus componentes moleculares) que no se puede entender de buenas a primeras por el término de “automantenimiento” (especialmente si éste se entiende en el sentido débil).²² En resumen, el problema básico de esta definición es que no caracteriza debidamente el tipo de organización material que pudiera permitir el inicio de un proceso de evolución darwiniana (cierto tipo de organización metabólica pregenética, precisamente).

La definición autopoietica

“Un sistema autopoietico —la organización viviente mínima— se define como una red de procesos de producción (síntesis y destrucción) de componentes tales que: *i*) continuamente regeneran y elaboran la red que los produce, y *ii*) forman el sistema como una unidad distinguible en el dominio en que existen.”²³

Esta definición, a pesar de su alto nivel de abstracción, es mucho más explícita que la anterior en relación con la captación de la organización básica que integra a un ser viviente mínimo: su metabolismo. La idea principal que plantea es

²⁰ P. L. Luisi, “About Various Definitions of Life”, *op. cit.*

²¹ Véase M. Eigen y P. Schuster, *The Hypercycle: A Principle of Natural Self-organization*, Springer, Nueva York, 1979; M. Eigen, *Steps toward Life. A Perspective on Evolution*, Oxford University Press, Nueva York, 1992.

²² Véase A. Moreno y K. Ruiz-Mirazo, “Metabolism and the Problem of its Universalization”, *BioSystems*, 49 (1): 45-61, 1999; K. Ruiz-Mirazo y A. Moreno, “Searching for the Roots of Autonomy. The Natural and Artificial Paradigms Revisited”, *Journal for the Integrated Studies of Artificial Intelligence, Cognitive, and Applied Epistemology*, 17: 209-228, 2000.

²³ F. J. Varela, “On Defining Life”, en G. R. Fleischaker, S. Colonna y P. L. Luisi (comps.), *Advances in Artificial Life*, Kluwer Academic Press, Dordrecht, 1994, pp. 23-31; véase H. Maturana y F. J. Varela, *De máquinas y seres vivos. Una teoría sobre la organización biológica*, Editorial Universitaria, Santiago de Chile, 1973.

que se debería definir la vida desde la perspectiva de los organismos individuales. Concibe a un ser viviente como una red recursiva de producción y transformación de sus componentes, una red que continuamente se autogenera y autorregenera, produciendo su delimitación física, la cual a su vez es una condición necesaria para el mantenimiento de la red. Todo esto significa un “autos” organizacional que va más allá de lo que usualmente se considera como un fenómeno de “autoorganización”, y que involucra a un grupo de procesos interrelacionados que se organiza según una lógica operativa global: el sistema de algún modo se “cierra sobre sí mismo”, en el sentido de que crea su propia delimitación y obedece a su propia dinámica circular de autoproducción.

Aun así, la definición autopoietica presenta dos problemas fundamentales.

1) Por una parte, es excesivamente abstracta. El propósito original de Maturana y Varela consistía en definir un sistema biológico de la manera más general posible. Sin embargo, se excedieron en este sentido, pues proponen una concepción de lo viviente que se distancia demasiado de los fenómenos físicos materiales y energéticos, requisitos cruciales para su verdadera implementación (como ya lo ha señalado Fleischaker).²⁴ Tal cosa conduce a caracterizar una “lógica organizativa mínima” de los sistemas biológicos en que la física y la química (en particular, la termodinámica) no participan y en que la relación interactiva-agente entre el sistema y el medio ambiente se pasa por alto (o, al menos, se considera secundaria). Pero los aspectos materiales termodinámicos implican una “lógica organizativa” de autoproducción totalmente diferente²⁵ que destaca la relación con el medio ambiente como uno de los ingredientes claves para entender cómo opera un sistema químico mínimo que se autoconstruye.²⁶

²⁴ G. R. Fleischaker, “Autopoiesis: The Status of its System Logic”, *BioSystems*, 22: 37-49, 1988.

²⁵ A. Moreno y K. Ruiz-Mirazo, “Metabolism and the Problem of its Universalization”, *BioSystems*, 49 (1): 45-61, 1999; S. A. Kauffman, “Autonomous Agents”, *op. cit.*

²⁶ K. Ruiz-Mirazo y A. Moreno, “Searching for the Roots of Autonomy: The Natural and Artificial Paradigms Revisited”, *Journal for the Integrated Study of Artificial Intelligence, Cognitive Science, and Applied Epistemology*, 17: 209-228, 2000. Es posible cuestionar similarmente otros modelos teóricos que han indagado el problema de qué podría ser un sistema viviente mínimo en términos generales abstractos (véase por ejemplo el planteamiento de R. Rosen, *Life Itself: A Comprehensive Inquiry into the Nature, Origin and Fabrication of Life*, Columbia University Press, Nueva York, 1991, y la “Teoría del chemoton” de Gánti, en T. Gánti, *The Principle of Life*, OMIKK, Budapest, 1987). Cualquier dinámica metabólica o protometabólica realmente tiene lugar lejos de condiciones de equilibrio (y para mantener estas condiciones todos los organismos mínimos posibles se deben constituir —y deben entenderse— como sistemas termodinámicamente abiertos). Por ende, es crucial introducir la dimensión energética-termodinámica desde el mismo inicio.

2) Por otra parte, incluso si se modificaran los criterios autopoieticos a fin de incluir algunos ingredientes adicionales, relacionados con el punto anterior, éstos no bastarían para caracterizar en forma cabal “lo viviente”. La capacidad de producir la diversidad y el aumento de la complejidad, en cuanto resultados de un selectivo proceso evolutivo, capacidad que constituye otro aspecto fundamental de los sistemas biológicos, no está al alcance de los sistemas autopoieticos. En principio, un sistema autopoietico es capaz de reproducirse (mediante el crecimiento y la división autocatalíticos), de adaptarse a los accidentes externos (la homeostasis organizativa) e incluso de modificar su tipo de organización —su identidad, en sentido amplio— (mediante la acumulación de cambios estructurales), pero no es capaz como tal de imitar un proceso de evolución darwiniana porque no posee los mecanismos genéticos que se requieren para hacerlo. Por lo tanto, el problema principal de esta definición es que la característica capacidad evolutiva de los seres vivos se pasa por alto.

Es interesante que ambas definiciones (la estándar y la autopoietica) abarquen los dos aspectos fundamentales de la fenomenología biológica. Como ya lo había observado Maynard Smith,²⁷ la vida puede darse tanto en poblaciones de sistemas hereditarios que se autorreproducen (la vida como evolución), como en unidades disipadoras individuales que se automantienen (la vida como metabolismo). El problema de ambas definiciones es que cada cual enfoca tan sólo una de estas dos dimensiones: ninguna de las dos definiciones resuelve adecuadamente, es decir, en forma equilibrada, la tensión entre los aspectos individual-metabólico y colectivo-ecológico del fenómeno de la vida. Una buena definición precisamente debería destacar el vínculo entre ambos, contribuyendo a su explicación.²⁸

A fin de poder hacerlo, es absolutamente necesario abordar el problema con una metodología que combine un planteamiento de “abajo-arriba” (siguiendo las diversas y sucesivas etapas en el proceso de la emergencia de los seres vivos a partir de complejos fenómenos físicoquímicos) y un planteamiento de “arriba-abajo” (especificando cuál es el resultado final del proceso, es decir, lo que se puede

²⁷ J. Maynard Smith, *The Problems of Biology*, Oxford University Press, Oxford, 1986.

²⁸ Tal cosa puede lograrse incluso si la definición se formula desde el punto de vista de los organismos individuales, es decir, a partir de lo que es un “ser viviente” y de cómo se organiza y comporta (así lo hacen los autores de la escuela autopoietica). El punto crucial (que sin embargo tales autores no consideran relevante) está en incluir los aspectos fundamentales que puedan revelar, en el nivel individual-metabólico del análisis, la existencia, tanto como las implicaciones importantes, de la participación en una dinámica colectiva-ecológica-evolutiva. De hecho, nuestra propuesta se elabora según este criterio.

considerar ya como “vida mínima”). Aquí se refleja, nuevamente, el hecho de que una definición de la vida (es decir, la principal compulsión del proceso de “arriba-abajo”) y de su origen (la secuencia de sucesos de “abajo-arriba”) son cuestiones inseparables. Por ende, nuestra propuesta se articula seguidamente en dos apartados diferentes: en el primero proponemos y explicamos brevemente nuestra definición (que pretende arraigarse en los actuales conocimientos sobre los sistemas vivientes, pero que al mismo tiempo también pretende ser una proyección que abarque sus propiedades más universales); y en el segundo ofrecemos una explicación genealógica de los fundamentos de esta definición, describiendo las principales transiciones que destacamos como necesarias y suficientes para el desenvolvimiento de cualquier mundo biológico. Los mecanismos básicos que subyacen en todas las transiciones se indicarán en el curso de la exposición, de manera que este segundo tipo de análisis también habrá de resultar, al final de esta parte, en una versión mejorada (más específica y funcional) de nuestra definición.

NUESTRA PROPUESTA: LA AUTONOMÍA Y LA EVOLUCIÓN
ABIERTA COMO INGREDIENTES BÁSICOS DE UNA NUEVA DEFINICIÓN
UNIVERSAL DEL SER VIVIENTE

Tras examinar dos de las definiciones representativas en el campo, ahora nos toca a nosotros proponer una alternativa que creemos que ofrece ventajas respecto a ambas propuestas. Aunque éstas satisfacen *grosso modo* los requisitos listados anteriormente, consideramos que la siguiente definición lo hace de manera más completa y satisfactoria (particularmente en relación con los requisitos (c) —sobre la elegancia conceptual y el poder explicativo— y (e) —sobre el equilibrio entre la universalidad y la especificidad—) y, por lo tanto, representa una mejora significativa. Empezaremos por definir la vida desde una perspectiva individual (desde la perspectiva de un solo “ser viviente” u “organismo”) y, posteriormente, discutiremos las implicaciones de tal definición en un más amplio nivel colectivo, proponiendo una concepción de la “vida” como fenómeno global.

La nueva definición que proponemos es: “*un ser viviente*” es cualquier sistema autónomo con capacidades evolutivas abiertas, donde

i) por *autónomo* entendemos un sistema lejos del equilibrio que se constituye y mantiene estableciendo una identidad organizativa propia, una unidad funcionalmente integrada (homeostática y activa) basada en una serie de acoplamientos

endergónicos-exergónicos entre los procesos internos de autoconstrucción, así como con otros procesos de interacción con su medio ambiente, y

ii) por capacidad evolutiva abierta entendemos el potencial de un sistema para reproducir su dinámica funcional-constitutiva básica, generando una diversidad ilimitada de sistemas equivalentes, de formas de expresar esa dinámica, que no están sujetos a ningún límite predeterminado superior de complejidad organizativa (aunque de hecho sí lo estén a las restricciones energéticas-materiales impuestas por un medio ambiente finito y por las leyes físicoquímicas universales).²⁹

A primera vista, nuestra definición podría parecer demasiado genérica y no muy funcional, puesto que no especifica el tipo de componentes o mecanismos moleculares que hacen posible un proceso autónomo y evolutivo de este tipo (membrana, catalizadores, gastos de energía, registros informativos...). Es ésta la labor que nos queda por delante. En el siguiente apartado analizaremos cómo esta forma de *ser*, *hacer* y *cambiar* en el tiempo puede realizarse e integrarse en un sistema (o grupo de sistemas). Mediante este análisis podremos dotar de un significado más profundo y preciso a los conceptos de la “autonomía” y de la “evolución abierta”, examinando particularmente la conexión entre ambos y arguyendo por qué uno debe preceder al otro.³⁰

En todo caso, la presente versión ya contiene los ingredientes teóricos fundamentales (necesarios y suficientes) para reconstruir los pasos esenciales del origen de la vida, desde los fenómenos físicoquímicos autoorganizativos hasta la

²⁹ Según este criterio, lo que realmente es crucial para que un sistema pueda considerarse como biológico es que tenga el *potencial* de ser parte de un proceso de evolución abierta. De hecho, hay organismos vivientes que en condiciones naturales no son capaces de reproducirse (por ejemplo, organismos estériles como las mulas, las abejas trabajadoras o las plantas sin semillas) y que, por lo tanto, no pueden continuar con el proceso evolutivo que los generó. No obstante, el análisis de los componentes moleculares de cualquiera de esos organismos revelaría que poseen todos los mecanismos necesarios para ese tipo de evolución. Las restricciones ontogénicas impiden su reproducción natural y su participación sucesiva en tal proceso (a pesar de que bien podríamos pensar en varias formas de superar esas dificultades; por ejemplo, mediante la clonación artificial o la reproducción vegetativa). Por lo tanto, mediante la utilización del término “capacidad” en la segunda parte de nuestra definición, hacemos la distinción entre las propiedades “reales” y las propiedades “en principio accesibles” de los seres vivientes, similar a la distinción que Gánti (*op. cit.*) hace entre los criterios *reales* (*absolutos*) y los *potenciales* de la vida, la cual es necesaria, como él lo demostró, para evitar los resultados contradictorios.

³⁰ Es posible que el lector asocie estos dos conceptos fundamentales con el nombre de Varela (“On Defining Life”, *op. cit.*) y de J. von Neumann, *Theory of Self-reproducing Automata*, University of Illinois Press, Urbana-Champaign, 1996 (véase también B. McMullin, “John von Neumann and the Evolutionary Growth of Complexity: Looking Backward, Looking Forward...”, *Artificial Life*, 6: 347-361, 2000). Sin embargo, nuestra descripción es radicalmente diferente porque pretende formular los requisitos físicos-materiales-energéticos detrás de estos conceptos (mientras que los planteamientos de Varela o de Von Neumann son mucho más abstractos).

constitución de sistemas con un nivel de complejidad equivalente al del último ancestro universal común de todas las formas de vida terráneas. Como ya dijimos, la definición autopoiética por sí misma no nos llevaría hasta ese punto (ya que un tipo de evolución abierta requiere el desarrollo de mecanismos excepcionales, por ejemplo, los que sustentan la reproducción hereditaria mientras que la definición estándar no es satisfactoria porque no proporciona las herramientas conceptuales clave para caracterizar la organización material básica que se requiere para llegar allí (el automantenimiento es en este sentido mucho más limitado que la “autonomía”).³¹

CONSTRUCCIÓN DE UNA EXPLICACIÓN GENEALÓGICA DE NUESTRA DEFINICIÓN

El punto de partida de nuestra explicación es una situación en que se llevan a cabo fenómenos de autoorganización (complejos fenómenos fisicoquímicos, como las llamadas “estructuras disipadoras” de Nicolis y Prigione).³² Por “autoorganización” entendemos un fenómeno que ocurre cuando una serie de procesos microscópicos no lineales genera una correlación global macroscópica (un nuevo “patrón de comportamiento dinámico”) en condiciones termodinámicas que están lejos del equilibrio y que se mantienen mediante la acción continua de una serie de restricciones, una de las cuales, por lo menos, resulta del fenómeno mismo.

Es obvio que los seres vivos no pueden existir sin procesos autoorganizados (ubícuos en todos los niveles de la organización biológica), pero las restricciones que le permiten a un organismo permanecer en una situación lejos del equilibrio son mucho más complejas. De hecho, el organismo *mismo* elabora las diversas restricciones que controlan el flujo de la materia y la energía a través del sistema, al contrario de lo que sucede en las estructuras disipadoras típicas (patrones de convección Bénard, reacciones químicas oscilantes B-Z), donde el flujo que mantiene la operación del fenómeno se restringe externamente. Por tanto, podemos afirmar con seguridad que la vida es la autoorganización (no estamos de acuerdo con aquellos que piensan que el “ser debe descartarse”; véase por

³¹ A pesar de su aparente similitud formal con la “definición estándar”, nuestra propuesta es más restrictiva, más exigente y, al mismo tiempo, posee un mayor potencial explicativo. Como se mostrará más detalladamente en la siguiente parte, la autonomía requiere mucho más que el automantenimiento temporal de una red química.

³² G. Nicolis y Y. Prigioni, *Self-organization in Non-Equilibrium Systems*, Wiley, Nueva York, 1977.

ejemplo, Margulis y Sagan),³³ aunque de hecho sea mucho más que la autoorganización.

Entonces, ¿cuál es el paso principal tras la autoorganización? El automantenimiento. Alguien podría decir que en los fenómenos autoorganizados puros ya es posible hablar del “automantenimiento” (en la medida que la generación del patrón macroscópico contribuye a su propio mantenimiento mediante su continua acción restrictiva en la dinámica microscópica). Sin embargo, en tal caso nosotros estaríamos utilizando el término en su sentido más débil. No puede tener lugar un *automantenimiento* más significativo hasta que el sistema no empiece a producir algunas de las restricciones que son cruciales en el control del flujo de energía a través de sí mismo y de esta manera empiece a desarrollar la capacidad para mantener su organización frente a las perturbaciones externas (es decir, un tipo primitivo de “homeostasis organizativa”). Un hecho que debe resaltarse aquí es que esto sólo puede suceder si el sistema es químico, puesto que los diversos mecanismos restrictivos que son necesarios para lograr esa capacidad simplemente no están al alcance de los sistemas puramente físicos. La dinámica (en su sentido clásico, el cambio en el tiempo de la posición de un cuerpo o de un sistema de muchos cuerpos) es insuficiente para semejante tarea. Además, como se patentizará más adelante, un proceso de aumento abierto de la complejidad únicamente puede darse a través de la química.³⁴

En consecuencia, la siguiente etapa es la de las redes químicas que se automantienen. Los sistemas constituidos por componentes moleculares relativamente sencillos, donde se forman ciclos autocatalíticos con el potencial de diversificarse y volverse más complejos,³⁵ podrían ser los agentes en esta etapa, siempre que estuvieran ubicados en un contexto físico adecuado, entre una emisión y una

³³ L. Margulis y C. Sagan, “Darwin’s Dilemma”, en *Acquiring Genomes: A Theory of the Origin of the Species*, Basic Books, Nueva York, 2002.

³⁴ Este asunto, la importancia de la química en el desarrollo de cualquier mundo biológico, merecería una discusión mucho más extensa, pero no siendo el enfoque central de este artículo simplemente ofrecemos un resumen muy condensado. En esta breve nota sólo podemos añadir que los procesos que permiten el verdadero *automantenimiento* de un sistema en condiciones lejos del equilibrio tienen que ser los procesos de la transformación de la materia, los procesos químicos, porque los componentes de un sistema de este tipo (incluidos los componentes que se relacionarían más directamente con la interfase o con las condiciones delimitadoras del sistema, es decir, con el control potencial del flujo de la materia-energía a través del sistema) no son estables porque resultan de esa continua dinámica química “transformadora”.

³⁵ S. A. Kauffman, *The Origins of Order. Self-organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, Oxford, 1993; W. Wächtershäuser, “Before Enzymes and Templates. Theory of Surface Metabolism”, *Microbiological Review*, 52: 452-484, 1998; C. de Duve, *op. cit.*, p. 9.

absorción de energía libre, como Morowitz³⁶ correctamente lo establece en su “teorema cíclico”. La termodinámica desempeña papeles importantes. Aunque no es posible explicar las transiciones pertinentes en esta etapa sólo mediante las herramientas y teorías termodinámicas, es muy importante no olvidar las extensas y profundas implicaciones de la estructura general termodinámica. Particularmente, en el caso de las redes químicas que se automantienen, resulta crucial la consideración de los requisitos energéticos (tanto los internos como los relacionados con el medio ambiente) para que las reacciones involucradas realmente se realicen. Como veremos en seguida, únicamente las redes que son capaces de establecer una serie de acoplamientos endergónicos-exergónicos entre sus procesos constituyentes, podrían considerarse como básicamente autónomas.³⁷

La emergencia de la autonomía básica

El concepto del automantenimiento, siendo importante, no logra captar las propiedades más características de un organismo viviente, en particular, su capacidad para construir y reconstruir continuamente todos los componentes y las restricciones que son responsables de su organización y comportamiento, así como su capacidad para modificar esta organización interna (y además la relación existente con el medio ambiente), adaptándola a los cambios externos. Los sistemas biológicos son redes químicas que producen componentes a fin de utilizar sus recursos materiales y energéticos en tal forma que continuamente puedan llevar a cabo una fluida dinámica de autoconstrucción global. Pero todo esto no sería posible si los procesos endergónicos (procesos no espontáneos como la síntesis de los polímeros o el transporte de una sustancia contra su gradiente electroquímico potencial) no pudieran beneficiarse del impulso exergónico de otros procesos espontáneos. Así, la generación —y regeneración— de los componentes que actúan como restricciones funcionales en el sistema se basa en el establecimiento de acoplamientos endergónicos-exergónicos (de allí la intrincada conjugación del anabolismo y el catabolismo en cualquier metabolismo).

³⁶ H. J. Morowitz, *Energy Flow in Biology*, Academic Press, Nueva York, 1968; H. J. Morowitz, *Beginning of Cellular Life*, Yale University Press, New Haven, 1992.

³⁷ K. Ruiz-Mirazo y A. Moreno, “Autonomy and Emergence: How Systems Became Agents through the Generation of Functional Constraints”, en G. L. Farre y T. Oksala (comps.), *Emergence, Complexity, Hierarchy, Organization: Selected and Edited Papers From the ECHO III Conference*, Finnish Academy of Technology, Espoo, 1998, pp. 273-282; S. A. Kauffman, “Autonomus Agents”, *op. cit.*, pp. 49-64.

Para nosotros, la transición de un simple sistema químico que se automantiene, a un complejo sistema con capacidades adaptativas mínimas que se auto-produce, requiere una red de reacciones encapsulada mediante una demarcación semipermeable construida por el mismo sistema, y también, al mismo tiempo, la solución de tres problemas fundamentales: *i*) una eventual crisis osmótica; *ii*) la coordinación espacio-temporal de todos los procesos (y sus acoplamientos), y *iii*) el logro de una eficiente transferencia de energía a través de los componentes y los procesos del sistema. La serie mínima de componentes que son necesarios para superar estos problemas son:³⁸ una *membrana* (un revestimiento mediante la cual el sistema controla las concentraciones que en él ocurren, diferenciándose claramente del medio ambiente y canalizando las interacciones con éste); un grupo de *elementos energéticos* (uno por lo menos que sea soluble en agua —como el PP_i o el ATP— y uno directamente relacionado con los procesos del transporte —como el gradiente potencial electroquímico de los protones o los iones de sodio a través de la membrana—); y una serie de *catalizadores* (polímeros o, inicialmente, sólo oligómeros más cortos como los “multímeros” de C. de Duve,³⁹ que modulen la frecuencia de las reacciones, establezcan los mecanismos para la regulación/homeostasis, y sean intermediarios en los procesos del transporte).

Es sólo cuando se conjuntan los tres tipos de componentes en un solo sistema y se interrelacionan adecuadamente, que puede darse una serie lo suficientemente completa de acoplamientos endergónicos-exergónicos y, conjuntamente, un sistema autónomo mínimo. Es importante observar que esta dinámica implica tanto una nueva forma interna de funcionamiento (las relaciones funcionales entre los componentes del sistema),⁴⁰ como una nueva forma de interactuar con el medio ambiente (el comportamiento operativo).⁴¹ Por lo tanto, este tipo de sistema puede crear su propio *Umwelt*, en el sentido básico y primitivo.

Algunos autores, como Luisi,⁴² podrían alegar que este tipo de sistema autónomo (protometabolismo celular) ya contiene todo lo que se requiere para la vida. De hecho, es difícil decir qué haríamos si alguna vez encontráramos semejante sistema (en un tubo de ensayo, en Marte, o en cualquier otro lugar): ¿ha-

³⁸ K. Ruiz-Mirazo, *Condiciones físicas para la aparición de sistemas autónomos con capacidades evolutivas abiertas*, tesis de doctorado, Universidad del País Vasco, San Sebastián, 2001.

³⁹ C. de Duve, *op. cit.*, p. 9.

⁴⁰ Las relaciones funcionales aparecen cuando todos los componentes de un sistema contribuyen, o participan, en el mantenimiento del mismo sistema.

⁴¹ Esta “operatividad básica” tiene que ver con la capacidad del sistema para controlar activamente algunas de las condiciones de su demarcación, como los gradientes de concentración.

⁴² P. L. Luisi, “About Various Definitions of Life”, *op. cit.*

bríamos de calificarlo de sistema “viviente”, a pesar de que no mostrara un comportamiento metabólico complejo basado en macromoléculas como los genes o las proteínas? En relación con este punto, nosotros consideramos que la autonomía básica es una propiedad fundamental de la vida, pero no la única. De hecho, el mantenimiento a largo plazo de los sistemas autónomos básicos no se podrá asegurar hasta que alcancen una versatilidad y robustez metabólica y construyan mecanismos para la reproducción confiable y para la herencia, junto con la capacidad abierta para adaptarse y aumentar su complejidad. En otras palabras, la estabilidad a largo plazo del mundo biológico depende decisivamente de la forma en que los seres vivos cambian en el curso del tiempo y evolucionan a través de las generaciones.⁴³ Tanto es así, que incluso lo que un organismo llega a ser y hacer durante su tiempo de vida está profundamente influido por el proceso evolutivo global en que se halla inserto, cuestión que resaltaremos después.

En todo caso, debemos señalar que la autonomía básica, aun siendo insuficiente, es necesaria para la evolución abierta. Sin una maquinaria de producción de componentes que resuelva los problemas físico-material-energéticos básicos involucrados en la constitución de cualquier sistema (proto)metabólico, es imposible que se alcance el nivel de complejidad molecular y organizativa requeridos para iniciar un proceso de evolución abierta. Además, la constitución de los sistemas autónomos básicos también proporciona el potencial necesario para la diversificación funcional (es decir, un “espacio fenotípico” lo suficientemente amplio), la cual es imprescindible en el desarrollo de los mecanismos de información genética,⁴⁴ y que no aparece en los modelos de evolución molecular relacionados con poblaciones de replicadores puros (como los típicos modelos del “mundo de ARN”).

*Sistemas hereditarios autónomos:
primeros pasos en la evolución abierta*

Los sistemas autónomos básicos, tal como se han descrito antes, poseen cierto grado de homeostasis y adaptabilidad organizativas, son capaces de la reproducción (aunque sólo sea de tipo “estadístico”, mediante el simple crecimiento y la simple división), y muestran un extraordinario potencial de diversificación (ya

⁴³ Puede ser que la exploración de Marte encuentre vestigios de protometabolismos, sistemas autónomos básicos, que no han superado las transiciones críticas a fin de iniciar una dinámica evolutiva abierta, y que por lo tanto no han logrado alcanzar un automantenimiento de largo plazo en el planeta.

⁴⁴ J. S. Wicken, *Evolution, Thermodynamics, and Information: Extending the Darwinian Program*, Oxford University Press, Oxford, 1987.

que en principio podrían crear componentes renovados). Sin embargo, no pueden fijar o registrar las innovaciones que en ellos aparecen (por ejemplo, las posibles innovaciones en su dinámica metabólica) y, en la medida que su complejidad molecular y organizativa aumenta, su fragilidad también.

Según algunos modelos recientes del desarrollo y potencial reproductor de las relativamente sencillas redes catalíticas,⁴⁵ en esta etapa ya podría darse cierta transferencia de la “información” de generación en generación (es ésta la idea detrás de lo que llamamos un “genoma composicional”). Claro es que la dinámica autocatalítica responsable del crecimiento (y sucesiva división-multiplicación) implica que algunos de los componentes y aspectos del “sistema madre” se producen una y otra vez y posiblemente se transmiten a los descendientes. Sin embargo, no es fiable la continua producción de componentes y su transmisión a las “células hijas”. A veces todo va bien y la reproducción tiene éxito, es decir, la célula madre y las células hijas son equivalentes o tienen un nivel de complejidad equivalente; pero algunas veces (una fracción que no se puede obviar, especialmente cuando se trata de poblaciones grandes y de un gran número de generaciones), el proceso produce sistemas inviables. Es ésta una cuestión crítica cuando la complejidad de los componentes y las dificultades para producirlos se incrementan más y más.

Es así que se puede producir un enorme cuello de botella en la complejidad, obstáculo que sólo puede superarse si los sistemas autónomos desarrollan nuevos y más avanzados mecanismos. Éstos deben garantizar que los complejos componentes funcionales del sistema se preserven a través de la dinámica metabólica y se transmitan a la siguiente generación mediante los sucesivos procesos de reproducción. La solución consiste en la producción de componentes funcionales que realicen una “actividad modular”, es decir, estructuras materiales que sean capaces de *replicarse*⁴⁶ fielmente, a pesar de su complejidad (es decir, en esta etapa, la longitud de la cadena polimérica) y de la frecuencia con que se realice el proceso. De esta manera, los componentes se convierten en “registros” materiales y es entonces posible empezar a hablar con rigor de la “herencia”.⁴⁷

⁴⁵ Véase D. Segré, D. Ben-Eli y D. Lancet, “Compositional Genomes: Prebiotic Information Transfer in Mutually Catalytic Non-Covalent Assemblies”, *Proceedings of National Academy of Sciences*, 97: 4112-4117, 2000.

⁴⁶ Como Dyson, Fleischaker y Luisi, nosotros diferenciamos la “replicación” y la “reproducción”. La primera es un proceso de copiado fiable que tiene lugar en el nivel molecular, mientras que la segunda implica la multiplicación espacial de toda una organización.

⁴⁷ H. H. Pattee, “Quantum Mechanics, Heredity and the Origin of Life”, *Journal of Theoretical Biology*, 17: 410-420, 1967; H. H. Pattee, “Cell Psychology: An Evolutionary Approach to the Symbol-Matter Problem”, *Cognition and Brain Theory*, 4: 325-341, 1982; H. H. Pattee, “The Physics of Symbols and Evo-

En consecuencia, un nuevo panorama surge con sistemas cuyo metabolismo es más complejo y robusto que anteriormente, cuya reproducción es más fiable y cuya dinámica evolutiva, además de ser más selectiva (mayor competencia entre los sistemas simultáneos por adquirir los limitados recursos), ya permite la posibilidad de definir —y trazar— los “linajes” (es decir, las relaciones asincrónicas entre sistemas con tiempos de vida desiguales). Esta etapa de los “sistemas autónomos hereditarios” (sistemas con una organización operativa basada en un solo tipo de polímero funcional)⁴⁸ es análoga a la de un “mundo del ARN”, pero, claro es, sólo si tal “mundo” forma parte de un metabolismo celular y no simplemente se establece experimental o teóricamente en el contexto de un reactor de flujo, como suele hacerse.⁴⁹

*El desacoplamiento genotipo-fenotipo
y el origen de la evolución abierta*

En todo caso, los sistemas autónomos hereditarios enfrentan una grave limitación cuando se trata de iniciar un proceso evolutivo realmente abierto: el desarrollo de mecanismos que permitan una mayor y más fiable conservación y transmisión de los componentes de generación en generación resulta ser incompatible con el desarrollo de la eficiencia funcional y la versatilidad metabólica de estos componentes. Tal cosa sucede porque, como lo mencionamos antes, estos sistemas se basan únicamente en un tipo de componente funcional complejo que articula tanto la *elaboración* como la *evolución* de su metabolismo y que tiene que acomodar simultáneamente dos propiedades muy diferentes: la actividad modular y la especificidad/eficiencia catalítica.⁵⁰

El problema tiene una explicación química bastante sencilla: la actividad modular requiere una morfología estable y uniforme que pueda copiarse linealmente, es decir, un ordenamiento espacial monótono que favorezca la baja reactividad y no sea modificado por los cambios secuenciales, mientras que la diversidad

lution of Semiotic Controls”, en M. Coombs, M. F. Sulcoski y J. L. Casti (comps.), *Workshop on Control Mechanisms for Complex Systems: Issues of Measurement and Semiotic Analysis*, Las Cruces, s. e., 1997.

⁴⁸ Un tipo de polímero que puede evolucionar mediante variaciones mutacionales en el espacio de sus secuencias posibles. (S. A. Benner, “How Small Can a Microorganism Be?”, en *Size Limits of Very Small Microorganism*, National Academy Press, Washington, 1999, pp. 126-135.)

⁴⁹ Para más detalles véase M. Eigen, *op. cit.*

⁵⁰ A. Moreno y J. Fernández, “Structural Limits for Evolutionary Capacities in Molecular Complex Systems”, *Biology Forum*, 83: 335-347, 1990; S. A. Benner, *op. cit.*

catalítica requiere precisamente lo contrario: una muy amplia gama de formas tridimensionales (la configuración de los sitios de la catálisis) que sean en extremo sensibles a las variaciones de la secuencia.

Este problema de “intercambio” significa otro gran obstáculo en el camino del establecimiento de las condiciones que permitan un aumento indefinido de la complejidad. Este obstáculo sólo puede superarse por aquellos sistemas autónomos que empiecen a producir *dos* tipos distintos de polímeros: “nuevos registros” que se especialicen en la captación, almacenamiento y replicación de ciertas estructuras lineales —o “secuencias” poliméricas— que serán críticas para su correcto funcionamiento (y el de los sistemas similares en las futuras generaciones) y “nuevos catalizadores” que se especialicen en llevar a cabo con cada vez mayor eficiencia las tareas estrictamente metabólicas que se requieran para su continua conformación como sistemas autónomos individuales.

Los nuevos registros estarían de alguna manera *desacoplados* respecto al metabolismo, en un estado casi inerte, y prácticamente no tendrían efectos causales en el funcionamiento del sistema, si no actuaran como una *referencia* fundamental para los nuevos catalizadores.⁵¹ Más precisamente, aquéllos deben *instruir* a la síntesis sobre éstos, es decir, los registros deben ser responsables de la correcta especificación de los catalizadores. Éstos, a su vez, deben controlar y regular catalíticamente todos los procesos en que se involucran los registros (la replicación, la traducción, la reparación, etc.), aunque sin tomar parte directamente en la generación y/o alteración de los registros (ya que esto debe determinarse por la dinámica evolutiva global de la población de agentes autónomos).

La clave consiste, por lo tanto, en el establecimiento de cierta circularidad —una conexión causal o correlación— entre ambos tipos de componentes (y sendos procesos que los acompañan). Pero dada la incompatibilidad estructural entre la capacidad para la replicación precisa del módulo (patrón) y el desarrollo de catalizadores más eficaces, resulta virtualmente imposible que la conexión entre ambos pueda construirse sobre la base de sus propiedades intrínsecas como polímeros. Al contrario, las condiciones que dan origen a estos componentes (es decir, el anterior mundo de polímeros únicos) establecen su relacionamiento mediante una serie de componentes intermediarios, es decir, de una manera no lineal y claramente *indirecta* (aun cuando el potencial de causar efectos entre sí no se pierda). Semejante conexión indirecta, mediada, es de hecho un requisito

⁵¹ H. H. Pattee, “Cell Psychology”, *op. cit.*; A. Moreno y K. Ruiz-Mirazo, “Key Issues Regarding the Origin, Nature, and Evolution of Complexity in Nature: Information as a Central Concept to Understand Biological Organizations”, *Emergence*, 4: 63-76, 2002.

para alcanzar un eficaz desacoplamiento entre estos dos modos o niveles operativos del sistema. Es precisamente lo que se requiere para que el tipo emergente de organización metabólica (que podría llamarse “metabolismo instruido”) combine coherente y fructíferamente las dos nuevas dimensiones de su actividad: la ontogénica-funcional (individual) y la filogénica-evolutiva (colectiva).

La manera más natural de entender este nuevo ordenamiento del sistema, esta nueva estructura organizativa (en parte desacoplada pero complementaria, es decir, *indirectamente acoplada*), es mediante la idea de la “información”.⁵² Otros autores han defendido una posición similar, alegando que lo que distingue a la vida es precisamente el hecho de que hay una relación tipo código entre el módulo (patrón) y los componentes funcionales.⁵³

Sólo cuando los sistemas autónomos hereditarios empiezan a producir componentes y mecanismos “informativos” (es decir, cuando un *código de traducción*⁵⁴ aparece entre dos tipos muy diferentes de componentes funcionales en el sistema), se convierte la diferenciación “genotipo-fenotipo” en algo realmente significativo (a pesar de que algunos autores, por ejemplo, Eigen,⁵⁵ intentan situarla anteriormente) y entonces podemos empezar a hablar de la evolución abierta propiamente. Es así, porque sólo a través de la generación de componentes que puedan replicarse con alta fiabilidad, que estén en un estado energéticamente degenerado, que sean interpretados como instrucciones por el sistema (es decir, “registros informativos” o, en la terminología de Maynard Smith y Szathmáry,⁵⁶ “replicadores hereditarios ilimitados”), los nuevos sistemas autónomos pueden empezar a construir *indefinidamente* nuevas formas de complejidad molecular y organizativa.

⁵² Por este término entendemos un tipo de conexión causal en un sistema a través de la cual algunos patrones materiales (casi) inertes restringen, mediante cierto mecanismo de “traducción-interpretación”, la dinámica metabólica del sistema. A su vez, es sólo mediante la participación de la maquinaria metabólica del sistema mismo, que los patrones informativos se convierten en instrucciones (A. Moreno, J. Umerez y J. Fernández, “Definition of Life and Research Program in Artificial Life”, *Ludus Vitalis*, 2: 15-33, 1994; A. Moreno y K. Ruiz-Mirazo, *op. cit.*)

⁵³ H. H. Pattee, “Dynamic and Linguistic Modes of Complex Systems”, *International Journal of General Systems*, 3: 259-266, 1997; H. H. Pattee, “Cell Psychology”, *op. cit.*; J. Hoffmeyer y C. Emmeche, “Code-Duality and the Semiotics of Nature”, en M. Anderson y F. Merrel (comps.), *On Semiotic Modeling*, Mouton de Gruyter, Nueva York, 1991, pp. 117-166; J. Umerez, “Semantic Closure: A Guiding Notion to Ground Artificial Life”, en F. Moran *et al.* (comps.), *Advances in Artificial Life*, Springer, Heidelberg, 1995, pp. 77-94.

⁵⁴ Como el “código genético” entre el ADN y las proteínas que existe en todos los seres vivos.

⁵⁵ M. Eigen, *op. cit.*

⁵⁶ J. Maynard Smith y E. Szathmáry, *The Major Transitions in Evolution*, Freeman, Oxford, 1995.

Corolario: retorno a la definición

En suma, para llegar a un escenario biológico completamente desarrollado, es necesario llegar hasta arriba, mientras no aparezca algún conjunto genéticamente informado de metabolismos. Si nos hubiéramos detenido antes (por ejemplo, en la etapa de los sistemas autónomos hereditarios básicos), no tendríamos todos los ingredientes claves para sustentar la organización de un ente viviente mínimo y ahora tendríamos que enfrentar el problema de requerir dos distintas —e incompatibles— concepciones de la vida mínima. La selección de estos ingredientes clave debe hacerse tomando en cuenta dos reglas: la “tesis de la continuidad” entre el mundo inerte y el viviente, y el hecho de que tienen que ser mecanismos o aspectos de la organización que sean tan fundamentales que no sea posible descartarlos en adelante, a través de la sucesiva historia evolutiva de este tipo de organización (como ha sucedido a lo largo de la historia evolutiva de la vida en la Tierra).

Consecuentemente, debemos hacer más explícita y funcional nuestra definición original de un ente viviente, “un sistema autónomo con capacidades evolutivas abiertas”, ya que podemos afirmar ahora que a fin de alcanzar esas dos propiedades, cualquier sistema debe tener:

una demarcación semipermeable activa (es decir, una membrana), un aparato de transducción/conversión de energía (una serie de unidades de energía) y, al menos, dos tipos de componentes macromoleculares interdependientes: unos para llevar a cabo y coordinar directamente los procesos de autoconstrucción (catalizadores) y otros para almacenar y transmitir la información que sea imprescindible para realizar eficazmente estos procesos en el curso de las sucesivas generaciones (los registros).

IMPLICACIONES TEÓRICAS:

LA VIDA ES UN FENÓMENO HISTÓRICO-COLECTIVO

Acaso la conclusión teórica más importante que del último apartado se puede extraer es que un ente viviente sólo puede existir en el contexto de una red global de sistemas similares.⁵⁷ Esta situación se refleja en el hecho de que los componen-

⁵⁷ Esto coincide totalmente con los recientes trabajos que critican la idea tradicional de un “ancestro común” (W. F. Doolittle, “Phylogenetic Classification and the Universal Tree”, *Science*, 284: 2124-2128, 1999), alegando que en vez de imaginarnos que a partir de una célula se derivaron todos los demás entes vivientes de la Tierra (mediante la “evolución vertical”), debemos visualizar su origen como una “po-

tes informativos que especifican los componentes metabólicos y la organización de las entidades biológicas particulares, para ser funcionales tienen que formarse a través de un proceso que involucre una gran cantidad de sistemas individuales, y además muchas generaciones consecutivas (o etapas reproductivas). Un proceso colectivo así, que tenga tanto un lado sincrónico-ecológico como un lado diacrónico-evolutivo, es en realidad imprescindible para la sustentabilidad del fenómeno viviente en su totalidad.

Por un lado, ya que los recursos materiales en cualquier medio ambiente físico real —como un planeta— son limitados, la vida tiene que aprender cómo hacer el mejor uso de lo que existe, y también de lo que ella misma produce. En la esfera individual, esto significa que los agentes vivientes tienen que competir por los compuestos orgánicos o sus precursores; así, bajo las presiones selectivas, es inevitable que se desarrollen estrategias depredadoras y, posteriormente, también “redes alimenticias” (inicialmente, claro es, sólo entre los sistemas unicelulares autótrofos y heterótrofos). En la esfera colectiva, el ecosistema a la larga tiene que solucionar el problema del reciclaje de los bioelementos en escala global. De lo contrario, sobrevendría una gran crisis que pondría en riesgo la permanencia de todo el mundo biológico. La solución consiste en acoplarse con los procesos físicos y geoquímicos que tengan lugar en el planeta, estableciendo ciclos globales biogeoquímicos. El control cibernético que la vida ejerza sobre las condiciones ambientales del planeta habitado, tales como la composición de la atmósfera,⁵⁸ habrá de asegurar su mantenimiento a largo plazo.

Por otro lado, un proceso abierto evolutivo (lo cual no significa una trayectoria evolutiva hacia una complejidad cada vez mayor, sino solamente la posibilidad de que haya un incremento sostenido en ésta) es precisamente lo que posibilita la continua renovación de los organismos individuales y los tipos particulares de organismos, a fin de mantener el funcionamiento del proceso general. Este proceso histórico abierto se desarrolla en una escala temporal mucho más larga que el típico tiempo de vida de los sistemas individuales y, como dijimos en la sección anterior, tan sólo se inicia cuando estos sistemas poseen una maquinaria genética que instruye a su metabolismo y que se transmite correctamente a través de las generaciones. Sin embargo, la dinámica evolutiva de los ecosistemas no

blación ancestral común” de sistemas metabólicos muy similares en constante evolución (tanto “vertical” como “horizontal”).

⁵⁸ J. E. Lovelock y L. Margulis, “Atmospheric Homeostasis by and for the Biosphere: The Gaia Hypothesis”, *Tellus*, 26: 2, 1947; J. E. Lovelock y L. Margulis, “Homeostatic Tendencies of the Earth’s Atmosphere”, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 1: 12-22, 1974.

surge “de buenas a primeras”: tiene que articularse en las etapas anteriores al origen de la genética, es decir, con anterioridad al origen de la vida.

En otras palabras, la información genética es el concepto medular que permite entender la intrincada conexión entre la dinámica funcional de los organismos individuales y la dinámica evolutiva de la red biológica global. No obstante, puesto que esta conexión no se establece repentinamente, tenemos que enfocar el análisis en el *origen* de la información genética, es decir, en cuáles son las condiciones más adecuadas para la instauración de la información genética. Esto nos lleva a estudiar la naturaleza de los sistemas autónomos básicos y hereditarios, tanto como la dinámica evolutiva en que estos dos tipos de sistema se implican. Nos atrevemos a decir que los pilares fundamentales de la “ecopoiesis”⁵⁹ y, por ende, los mecanismos claves (individuales y colectivos) que son necesarios para generar una biosfera sustentable, se ensamblan durante el desarrollo de la autonomía básica y hereditaria. Por lo tanto, estarían estrechamente vinculados los problemas del origen de la vida y de la constitución de una biosfera en constante evolución abierta. Se requiere aún de más investigación para apoyar esta línea de pensamiento.

En conclusión, podemos decir que la “vida” —en el sentido amplio de la palabra— *es una compleja red colectiva compuesta de agentes autorreproductivos autónomos cuya organización básica se instruye mediante los registros materiales generados a través del proceso histórico-evolutivo de esta red colectiva.*

i) En el nivel individual, los agentes autónomos son un tipo especial de organizaciones autodemarcadas disipativas que se mantienen en forma adaptativa y recursiva gracias a los registros materiales creados y transmitidos en el curso de sucesivas generaciones.

ii) En el nivel colectivo, un linaje de agentes autorreproductivos, autónomos, y evolutivos (proceso diacrónico) que compiten y cooperan entre sí (proceso sincrónico) genera nuevos registros —la información genética— que desde el momento que se instalan en las organizaciones individuales permiten nuevas interacciones funcionales abiertas.

Es tan intrincada la conjugación entre estos dos niveles, que los organismos colectivos y los individuales de la vida son, unos de los otros, a la vez la causa y la consecuencia. Sin embargo, es importante subrayar que también existe una asime-

⁵⁹ El proceso de la constitución de un ecosistema. (R. H. Haynes, “Ecce Eccepoiesis: Playing God on Mars”, en D. MacNiven [comp.], *Moral Expertise: Studies in Practical and Professional Ethics*, Routledge, Londres, 1990, pp. 161-183.)

tría básica entre la red individual (metabólica) y la red colectiva (ecológica): ambas son organizaciones que se automantienen y se autorreproducen, *pero* sólo los entes vivientes individuales (los organismos) son *agentes* autónomos con una demarcación física y activa autoproducida, más un alto grado de *integración funcional* entre sus componentes, más una maquinaria para la *reproducción hereditaria*.

IMPLICACIONES PRÁCTICAS

En conclusión, quisiéramos destacar brevemente las principales implicaciones prácticas de nuestra propuesta y de la concepción general que aquí ofrecemos para su futura investigación. En este sentido, se presentan cuatro vías de investigación distintas:

a) *El origen de la vida en la Tierra*. Las investigaciones actuales están muy influidas por la biología molecular y la genómica, de manera que enfocan los aspectos estructurales principales, las propiedades extrínsecas y las posibles raíces sintéticas abióticas de los biopolímeros (las proteínas, el ARN, el ADN) y sus precursores.⁶⁰ Nuestra propuesta se basa en la convicción de que la “energética” se debe explicar antes que la “genética”⁶¹ (y, por lo tanto, que es necesario que exista antes una organización protometabólica para que puedan surgir los biopolímeros),⁶² y prefiere un paradigma alternativo: la investigación de otros sistemas celulares autoconstruidos que sucesivamente producen macromoléculas funcionales (las cuales siempre hay que ver en el contexto de la organización metabólica en conjunto). En todo caso, nuestra definición permite la delineación de la secuencia general de transiciones desde lo no viviente a lo viviente (véase la figura XXV.1).

b) *Astrobiología*. La definición propuesta en este artículo (particularmente su versión más extensa) proporciona tanto el marco conceptual necesario para desarrollar biomarcadores como los criterios para diferenciar lo viviente de las organizaciones materiales inertes. i) En el nivel individual, un sistema viviente debe tener una demarcación activa semipermeable, una serie de unidades de energía y, por lo menos, dos tipos de componentes macromoleculares interdependientes (análogos a las proteínas y a los ácidos nucleicos); por lo tanto, un virus no sería

⁶⁰ Para una visión de conjunto, véase A. Lazcano, “Origin of Life”, en D. E. G. Briggs y P. R. Crowther (comps.), *Paleobiology II*, Blackwell Science, Oxford, 2001, pp. 3-8.

⁶¹ H. J. Morowitz, “Phase Separation, Charge Separation, and Biogenesis”, *BioSystems*, 14: 41-47, 1981.

⁶² H. J. Morowitz, B. Heinz y D. W. Deamer, “The Chemical Logic of a Minimal Protocell”, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 18: 281-287, 1988; C. de Duve, *op. cit.*

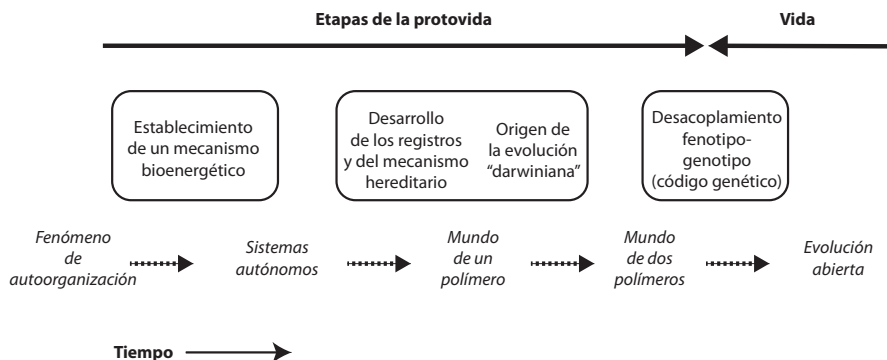


FIGURA XXV.1. Representación esquemática de la secuencia de transiciones desde lo no viviente hasta lo viviente que este artículo propone.

Una vez que los sistemas autónomos establecen mecanismos bioenergéticos (que podrían verse como las protocélulas en el “mundo de los monómeros” de Shapiro [R. Shapiro, “Monomer World”, Abstracts of the 13th International Conference on the Origin of Life, 10th ISSOL Meeting, Oaxaca, México, 2002] o como el “mundo de los tioesteres” de C. de Duve [C. de Duve, op. cit.] se instauran las bases termodinámicas para el origen de los registros y el inicio de un “mundo de un polímero” celular (semejante a un “mundo de ARN”). En la transición a esta etapa, también pueden considerarse diversos modelos recientes, como la “replicación composicional” de Lancet (D. Segré, D. Ben-Eli y D. Lancet, op. cit.) Este escenario sería el punto de partida de un proceso de evolución “darwiniana” (un proceso evolutivo en que intervienen la reproducción, la variabilidad y la herencia, pero todavía sin una separación genotipo-fenotipo). En todo caso, de acuerdo con nuestra definición, el origen de la vida tendría lugar únicamente desde el momento en que se estableciera el código genético, es decir, en la transición del mundo de un polímero a un “mundo de dos polímeros”. A partir de este momento, las capacidades de la evolución abierta entran en escena.

un organismo viviente, pero un organismo estéril sí. ii) En el nivel global, la vida sólo existiría como un fenómeno colectivo-histórico de larga duración en un planeta, el cual sería habitable de manera duradera como consecuencia del desenvolvimiento espacial de la vida y el funcionamiento de sus mecanismos homeorréticos.⁶³ Por consiguiente, deberá haber signos externos (como la composición marcadamente lejos del equilibrio de la atmósfera) que nos dirían si hay o no vida en el planeta.⁶⁴

⁶³ C. Sagan y L. Margulis, “Gaia and Philosophy”, en L. S. Rouner (comp.), *On Nature*, University of Notre Dame Press, Notre Dame, 1984, pp. 60-75; J. E. Lovelock, *The Ages of Gaia*, W. W. Norton, Nueva York, 1998.

⁶⁴ R. Hitchcock y J. E. Lovelock, “Life Detection by Atmospheric Analysis”, *Icarus*, 7: 149-159, 1967.

c) *La vida artificial*. De los tres principales subcampos que ha desarrollado la vida artificial, es decir, los modelos estrictamente computacionales, la robótica y los experimentos *in vitro*, por el momento el que más se corresponde con nuestra perspectiva es el último.⁶⁵ Los modelos computacionales tienden a no tomar en cuenta los aspectos físicos-materiales-energéticos de la organización biológica, cosa que para nosotros es crucial, mientras que la robótica, inclusive la llamada “robótica autónoma”, le presta muy poca atención al problema de la autoconstrucción (el cual de hecho es bastante difícil, si no imposible, de tratar fuera de la química). Así, nosotros consideramos que la vía de investigación más prometedora en esta área es la de los experimentos *in vitro*, siempre que enfoquen primordialmente la implementación química de protometabolismos celulares relativamente sencillos (es decir, los sistemas autónomos básicos), y especialmente si lo hacen sin tomar prestados de los sistemas biológicos componentes o mecanismos.⁶⁶ Esta vía podría estar hoy al alcance de nosotros, aunque tender un puente entre tales sistemas autónomos básicos y la vida, bajo las condiciones experimentales reales, sea un asunto muy diferente.

d) *La teoría biológica*. Nosotros consideramos que se requiere un profundo debate conceptual a fin de clarificar el desarrollo de una teoría general de la biología. Los esfuerzos por alcanzar un consenso respecto a una posible definición universal de la vida podrían ser de gran ayuda en esta tarea. Nuestra propuesta pretende ser una contribución en este sentido, al plantear la autonomía y la evolución abierta como las ideas claves en que se puede trabajar. Ninguna teoría general de la organización biológica se logrará hasta que no descubramos los mecanismos y principios que subyacen en estas propiedades básicas y, especialmente, la forma en que se entretienen para producir la fenomenología viviente.

BIBLIOGRAFÍA

- Benner, S. A., “How Small Can a Microorganism Be?”, en *Size Limits of Very Small Microorganism*, National Academy Press, Washington, 1999, pp. 126-135.
- Brooks, D. R., y E. O. Wiley, *Evolution as Entropy: Toward a Unified Theory of Biology*, The University of Chicago Press, Chicago, 1998.

⁶⁵ D. W. Deamer, “Membrane Compartments in Prebiotic Evolution”, en A. Brack, *The Molecular Origins of Life: Assembling the Pieces of the Puzzle*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998, pp. 189-205; J. W. Szostak, P. Bartel y P. L. Luisi, “Synthesizing Life”, *Nature*, 409: 387-390, 2001.

⁶⁶ P. Bro, “Chemical Reaction Automata”, *Complexity*, 2: 38-44, 1997.

- Bro, P., "Chemical Reaction Automata", *Complexity*, 2: 38-44, 1997.
- Cleland, C. E., y C. F. Chyba, "Defining 'Life'", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 32: 387-393, 2002.
- Deamer, D. W., "Membrane Compartments in Prebiotic Evolution", en A. Brack, *The Molecular Origins of Life: Assembling the Pieces of the Puzzle*, Cambridge University Press, Cambridge, 1998, pp. 189-205.
- Doolittle, W. F., "Phylogenetic Classification and the Universal Tree", *Science*, 284: 2124-2128, 1999.
- Duve, C. de, *Blueprint for a Cell: The Nature and Origin of Life*, Neil Patterson, Burlington, 1991.
- Dyson, F. J., *Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- Eigen, M., *Steps toward Life. A Perspective on Evolution*, Oxford University Press, Nueva York, 1992.
- Eigen, M., y P. Schuster, *The Hypercycle: A Principle of Natural Self-organization*, Springer, Nueva York, 1979.
- Emmeche, C., *Defining Life as a Semiotic Phenomenon. Cibernet: Human Knowing*, Springer, Nueva York, 1998.
- Farmer, J. D., y A. Belin, "Artificial Life: The Coming Evolution", en C. G. Langton, J. D. Taylor y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 815-838.
- Fernández, J., A. Moreno y A. Etxeberria, "Life as Emergence: The Roots of a New Paradigm in Theoretical Biology", *World Futures*, 32: 133-149, 1991.
- Fleischaker, G. R., "A Few Precautionary Words Concerning Terminology", en G. R. Fleischaker, S. Colona y P. L. Luisi (comps.), *Self-reproduction of Supramolecular Structures for Synthetic Structures to Model of Minimal Living Systems*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1994, pp. 33-41.
- , "Autopoiesis: The Status of its System Logic", *BioSystems*, 22: 37-49, 1988.
- Gánti, T., *The Principle of Life*, OMIKK, Budapest, 1987.
- Haynes, R. H., "Ecce Eccepoiesis: Playing God on Mars", en D. MacNiven (comp.), *Moral Expertise: Studies in Practical and Professional Ethics*, Routledge, Londres, 1990, pp. 161-183.
- Hitchcock, D. R., y J. E. Lovelock, "Life Detection by Atmospheric Analysis", *Icarus*, 7: 149-159, 1967.
- Hoffmeyer, J., y C. Emmeche, "Code-Duality and the Semiotics of Nature", en M. Anderson y F. Merrel (comps.), *On Semiotic Modeling*, Mouton de Gruyter, Nueva York, 1991, pp. 117-166.
- Joyce, G. F., "Foreword", en D. W. Deamer y G. R. Fleischaker (comps.), *Origins of Life: The Central Concepts*, Jones & Bartlett, Boston, 1994, pp. IX-XII.

- Kauffman, S. A., "Autonomous Agents", en *Investigations*, Oxford University Press, Oxford, 2000.
- , *The Origins of Order. Self-organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, Oxford, 1993.
- Koshland, D. E., "The Seven Pillars of Life", *Science*, 295: 2215-2216, 2002.
- Lazcano, A., "Origin of Life", en D. E. G. Briggs y P. R. Crowther (comps.), *Paleobiology II*, Blackwell Science, Oxford, 2001, pp. 3-8.
- Lewontin, R. C., "The Units of Selection", *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1: 1-18, 1979.
- Lovelock, J. E., *The Ages of Gaia*, W. W. Norton, Nueva York, 1998.
- Lovelock, J. E., y L. Margulis, "Atmospheric Homeostasis by and for the Biosphere: The Gaia Hypothesis", *Tellus*, 26: 2, 1947.
- , "Homeostatic Tendencies of the Earth's Atmosphere", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 1: 12-22, 1974.
- Luisi, P. L., "About Various Definitions of Life", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 28: 613-622, 1998.
- , "The Chemical Implementation of Autopoiesis", en G. R. Fleischaker, S. Colona y P. L. Luisi (comps.), *Self-reproduction of Supramolecular Structures for Synthetic Structures to Model of Minimal Living Systems*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1994, pp. 179-197.
- Margulis, L., "Big Trouble in Biology: Physiological Autopoiesis versus Mechanistic Neo-Darwinism", en J. Brockman (comp.), *Doing Science: The Reality Club 2*, Prentice Hall, Nueva York, 1990, pp. 211-235.
- Margulis, L., y C. Sagan, "Darwin's Dilemma", en *Acquiring Genomes: A Theory of the Origin of the Species*, Basic Books, Nueva York, 2002.
- Maturana, H., y F. J. Varela, *De máquinas y seres vivos. Una teoría sobre la organización biológica*, Editorial Universitaria, Santiago de Chile, 1973.
- Maynard Smith, J., *The Problems of Biology*, Oxford University Press, Oxford, 1986.
- Maynard Smith, J., y E. Szathmáry, *The Major Transitions in Evolution*, Freeman, Oxford, 1995.
- Mayr, E., *The Growth of Biological Thought*, Harvard University Press, Cambridge, 1982.
- McMullin, B., "John von Neumann and the Evolutionary Growth of Complexity: Looking Backward, Looking Forward...", *Artificial Life*, 6: 347-361, 2000.
- Moreno, A., y J. Fernández, "Structural Limits for Evolutive Capacities in Molecular Complex Systems", *Biology Forum*, 83: 335-347, 1990.
- Moreno, A., y K. Ruiz-Mirazo, "Metabolism and the Problem of its Universalization", *BioSystems*, 49 (1): 45-61, 1999.

- Moreno, A., y K. Ruiz-Mirazo, "Key Issues Regarding the Origin, Nature, and Evolution of Complexity in Nature: Information as a Central Concept to Understand Biological Organizations", *Emergence*, 4: 63-76, 2002.
- Moreno, A., J. Umerez y J. Fernández, "Definition of Life and Research Program in Artificial Life", *Ludus Vitalis*, 2: 15-33, 1994.
- Morowitz, H. J., *Beginning of Cellular Life*, Yale University Press, New Haven, 1992.
- , *Energy Flow in Biology*, Academic Press, Nueva York, 1968.
- , "Phase Separation, Charge Separation, and Biogenesis", *BioSystems*, 14: 41-47, 1981.
- Morowitz, H. J., B. Heinz y D. W. Deamer, "The Chemical Logic of a Minimal Protocell", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 18: 281-287, 1988.
- Nicolis, G., e Y. Prigioni, *Self-organization in Non-equilibrium Systems*, Wiley, Nueva York, 1977.
- Oparin, A. I., "The Nature of Life", en *Life: Its Nature, Origin and Development*, Academic Press, Nueva York, 1961, pp. 1-37.
- Pattee, H. H., "Cell Psychology: An Evolutionary Approach to the Symbol-Matter Problem", *Cognition and Brain Theory*, 4: 325-341, 1982.
- , "Dynamic and Linguistic Modes of Complex Systems", *International Journal of General Systems*, 3: 259-266, 1997.
- , "Quantum Mechanics, Heredity and the Origin of Life", *Journal of Theoretical Biology*, 17: 410-420, 1967.
- , "The Physics of Symbols and Evolution of Semiotic Controls", en M. Coombs, M. F. Sulcoski y J. L. Casti (comps.), *Workshop on Control Mechanisms for Complex Systems: Issues of Measurement and Semiotic Analysis*, Las Cruces, s. e., 1997.
- Pályi, G., C. Zucchi y L. Cagliotti, *Fundamentals of Life*, Elsevier, Nuva York, 2002.
- Rosen, R., *Life Itself: A Comprehensive Inquiry into the Nature, Origin and Fabrication of Life*, Columbia University Press, Nueva York, 1991.
- Ruiz-Mirazo, K., "Condiciones físicas para la aparición de sistemas autónomos con capacidades evolutivas abiertas", tesis de doctorado, Universidad del País Vasco, San Sebastián, 2001.
- Ruiz-Mirazo, K., y A. Moreno, "Autonomy and Emergence: How Systems Became Agents through the Generation of Functional Constraints", en G. L. Farre y T. Okasala (comps.), *Emergence, Complexity, Hierarchy, Organization: Selected and Edited Papers From the ECHO III Conference*, Finnish Academy of Technology, Espoo, 1998, pp. 273-282.
- , "Searching for the Roots of Autonomy. The Natural and Artificial Paradigms Revisited", *Journal for the Integrated Studies of Artificial Intelligence, Cognitive, and Applied Epistemology*, 17: 209-228, 2000.
- Sagan, C., "Life", en *Encyclopædia Britannica*, William Benton, Londres, 1970.

- Sagan, C., y L. Margulis, "Gaia and Philosophy", en L. S. Rouner (comp.), *On Nature*, University of Notre Dame Press, Notre Dame, 1984, pp. 60-75.
- Segré, D., D. Ben-Eli y D. Lancet, "Compositional Genomes: Prebiotic Information Transfer in Mutually Catalytic Non-Covalent Assemblies", *Proceedings of National Academy of Sciences*, 97: 4112-4117, 2000.
- Shapiro, R., "Monomer World", en *Abstracts of the 13th International Conference on the Origin of Life, 10th ISSOL Meeting*, Oaxaca, México, 2002.
- Shapiro, R., y G. Feinberg, "Possible Forms of Life in Environments Very Different From the Earth", en J. Leslie (comp.), *Physical Cosmology and Philosophy*, Macmillan, Nueva York, 1990, pp. 248-255.
- Smith, M., *The Problems of Biology*, Oxford University Press, Oxford, 1986.
- Szostak, J. W., P. Bartel y P. L. Luisi, "Synthesizing Life", *Nature*, 409: 387-390, 2001.
- Umerez, J., "Semantic Closure: A Guiding Notion to Ground Artificial Life", en F. Moran, A. Moreno, J. J. Merelo y P. Chaco (comps.), *Advances in Artificial Life*, Springer, Dordrecht, 1995, pp. 77-94.
- Varela, F. J., "On Defining Life", en G. R. Fleischaker, S. Colonna y P. L. Luisi (comps.), *Advances in Artificial Life*, Kluwer Academic Press, Dordrecht, 1994, pp. 23-31.
- , *Principles of Biological Autonomy*, Elsevier, Nueva York, 1979.
- Von Neuman, J., *Theory of Self-reproducing Automata*, Universidad de Illinois Press, Champaign, 1996.
- Wächtershäuser, W., "Before Enzymes and Templates. Theory of Surface Metabolism", *Microbiological Review*, 52: 452-484, 1998.
- Wicken, J. S., *Evolution, Thermodynamics, and Information: Extending the Darwinian Program*, Oxford University Press, Oxford, 1987.

Carol E. Cleland y Christopher Chyba

XXVI. ¿HAY UNA DEFINICIÓN DE LA “VIDA”?*

INTRODUCCIÓN

La pregunta “¿Qué es la vida?” es fundamental en la biología y especialmente importante para los astrobiólogos que algún día pudieran encontrar un tipo de vida totalmente alienígena. ¿Pero cómo plantearse la pregunta? Una estrategia ampliamente adoptada entre los científicos es el intento de definir la ‘vida’.¹ Este capítulo evalúa de manera crítica tal propósito. Nosotros alegamos, basándonos en nuestras investigaciones filosóficas sobre la naturaleza de la lógica y del lenguaje, que no es probable que tenga éxito. Proponemos una estrategia diferente que acaso muestre ser más fructífera en la búsqueda de la vida extraterrestre.

Iniciamos con una revisión de los intentos de definir la ‘vida’ y de su utilidad en la búsqueda de la vida extraterrestre. Como se verá, estas definiciones generalmente se topan con notables contraejemplos, y acaso crean tantos problemas como los que solucionan.

A fin de explicar por qué los intentos de definir la ‘vida’ enfrentan tantas dificultades, debemos antes exponer los argumentos filosóficos de fondo que se requieren para entenderlo. Por lo tanto, en estas páginas discutimos la cuestión de la naturaleza de las definiciones y de las llamadas declaraciones de identidad teórica. Más adelante aplicamos al proyecto de la definición de la ‘vida’ los argumentos desarrollados por nosotros. Pensamos que es errónea la idea de que se pueda responder a la pregunta “¿Qué es la vida?” mediante una definición de la “vida”, puesto que se basa en confusiones respecto a la naturaleza de las defini-

* Este capítulo apareció originalmente en W. T. Sullivan III y J. A. Baross (comps.), *Planets and Life: The Emerging Science of Astrobiology*, Cambridge University Press, Cambridge, 2007, pp. 119-131.

¹ Las comillas sencillas en torno a una palabra indican que se menciona, pero que no se utiliza. Las definiciones proporcionan un ejemplo. Como se expone aquí, las definiciones enfocan el significado y el lenguaje. Otro ejemplo sería la afirmación de que “vida” tiene cuatro letras; compárese esto con la muy diferente afirmación de que la vida se originó en la Tierra hace aproximadamente 4000 millones de años.

ciones y su capacidad para responder a preguntas fundamentales sobre las categorías naturales.²

Para dar una respuesta a la pregunta “¿Qué es la vida?” no se requiere una definición, sino una teoría general sobre la naturaleza de los sistemas vivientes. En ausencia de semejante teoría, nos encontramos en una situación análoga a la de un investigador del siglo XVI que intentara definir el ‘agua’ antes de que se formulara la teoría molecular. Solamente hubiera podido definirla con base en sus propiedades sensitivas, tales como su humedad, su transparencia, su carencia de olor y sabor, su capacidad de calmar la sed y de ser un buen solvente. Pero el análisis visual o conceptual de estos aspectos, a pesar de la profundidad con que se pudiera realizar, no revelaría jamás que el agua es H₂O. Sin embargo, como hoy sabemos, “H₂O” es la respuesta científicamente más informativa a la pregunta “¿Qué es el agua?” De manera análoga, en ausencia de una teoría general de la naturaleza de los sistemas vivientes, el análisis de los aspectos que actualmente asociamos con la vida con toda probabilidad no proporcionaría una respuesta particularmente informativa a la pregunta “¿Qué es la vida?”

LOS INTENTOS DE DEFINIR LA VIDA

La historia de los intentos de definir la ‘vida’ es muy larga y se remonta por lo menos a Aristóteles, quien definió la ‘vida’ como la capacidad de la reproducción.³ Hasta la fecha no existe una definición de la ‘vida’ que haya sido aceptada ampliamente.⁴ La literatura científica está llena de propuestas; hace algunos decenios, Sagan⁵ catalogó las definiciones fisiológicas, metabólicas, bioquímicas, darwinianas (que él llamó “genéticas”) y termodinámicas, junto con sus contraejemplos. Ha habido muchas otras propuestas.⁶ Todas en general son problemáticas, ya que

² C. E. Cleland y C. F. Chyba, “Defining ‘Life’”, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 32: 387-393, 2002.

³ Aristóteles, *De Anima*, en R. Mckeon (comp.), *The Basic Works of Aristotle*, Random House, Nueva York, 1941, pp. 535-606 (415a22 – 425b2); G. B. Matthews, “Consciousness and Life”, *Philosophy*, 53: 13-26, 1977; véase también C. Shields, *Order in Multiplicity*, Oxford University Press, Oxford, 1999.

⁴ C. F. Chyba y G. D. McDonald, “The Origin of Life in the Solar System: Current Issues”, *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 215-249, 1995.

⁵ C. Sagan, s. v. “Life”, en *Encyclopædia Britannica*, vol. xv, Encyclopædia Britannica, Chicago, 1970. [Capítulo XXIII en esta edición.]

⁶ Lahav ha compilado 48 definiciones de la vida (con referencias) que fueron propuestas entre 1855 y 1997: N. Lahav, *Biogenesis: Theories of Life's Origins*, Oxford University Press, Nueva York, 1999, pp. 117-121. Véase, por ejemplo, E. Schrödinger, *What is Life? The Physical Aspects of the Living Cell*, Cambridge University Press, Cambridge, 1945; J. Monod, *Chance and Necessity: An Essay on the Natural Philosophy*

incluyen fenómenos que la mayoría de los científicos no están dispuestos a considerar como fenómenos de la vida, o que excluyen entes que sin duda son vivientes.⁷

Veamos, a modo de ilustración, algunas de las definiciones propuestas.⁸ Una definición *metabólica*, por ejemplo, podría basarse en la capacidad que tiene un organismo para consumir y transformar la energía a fin de moverse, crecer o reproducirse. Pero se podría decir que el fuego, y acaso también los automóviles, pueden satisfacer todos o algunos de estos criterios. Una definición *termodinámica* podría describir un sistema viviente como uno que aprovecha la energía a fin de crear el orden localmente, pero esto también podría decirse de los cristales, que por lo general no se consideran entes vivientes, al igual que el fuego. Una definición *bioquímica* podría basarse en la presencia de ciertos tipos de biomoléculas, pero nos debería preocupar que cualquier opción molecular de este tipo pudiera en el futuro toparse con contraejemplos —en la forma de sistemas que en todo pudieran parecernos vivientes pero que no estuvieran compuestos de las moléculas que particularmente favorecemos—. Las definiciones *genéticas* o *darwinianas* hoy se prefieren generalmente a las anteriores, pero éstas también tienen desventajas que veremos en detalle más adelante.

Otro tipo de planteamiento ha sido no tanto “definir” la vida sino simplemente dar una lista de sus supuestas características.⁹ Pero los mismos problemas esen-

of Modern Biology, Knopf, Londres, 1971; G. Feinberg y R. Shapiro, *Life beyond Earth: Intelligent Earthlings' Guide to the Universe*, William Morrow, Nueva York, 1980; F. Dyson, *Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985; H. Kammenga, “Historical Perspective: The Problem of the Origin of Life in the Context of Developments in Biology”, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 18: 1-11, 1988; G. R. Fleischaker, “Origins of Life: An Operational Definition”, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 20: 127-137, 1990; G. F. Joyce, “Forward”, en D. Deamer y G. Fleischaker (comps.), *Origins of Life: The Central Concepts*, Jones & Bartlett, Boston, 1994, pp. xi y xii, 1994; C. P. McKay, “Origins of Life”, en J. Shirley y R. Fairbridge (comps.), *Van Nostrand Reinhold Encyclopædia of Planetary Sciences and Astrogeology*, Van Nostrand, Nueva York, 1994, pp. 387-391; R. Shapiro y G. Feinberg, “Possible Forms of Life in Environments very Different from the Earth”, en B. Zuckerman y M. Hart (comps.), *Extraterrestrials: Where are They?*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995, pp. 165-172; M. Bedau, “The Nature of Life”, en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Oxford, 1996, pp. 332-357; M. Rizzoti (comp.), *Defining Life*, Padova University Press, Padua, 1996; C. Adami, *Introduction to Artificial Life*, Springer, Nueva York, 1998; S. Kauffman, *Investigations*, Oxford University Press, Oxford, 2000; P. G. Conrad y K. H. Nealson, “A Non-Earth-Centric Approach to Life Detection”, *Astrobiology*, 1: 15-24, 2001; F. M. Harold, “Postscript to Schrödinger: So What is Life?”, *American Society for Microbiology News*, 67: 611-616, 2001; D. Schulze-Maluch *et al.*, “Redefining Life: An Ecological, Thermodynamic, and Bioinformatic Approach”, en G. Palyi, C. Zucchi y L. Caglioli (comps.), *Fundamentals of Life*, Elsevier, Nueva York, 2002, pp. 169-179.

⁷ C. F. Chyba y G. D. McDonald, *op. cit.*

⁸ C. Sagan, “Life”, *op. cit.*

⁹ Por ejemplo, E. Mayr, *The Growth of Biological Thought*, Belknap Press, Cambridge, 1982; D. E. Koshland, “The Seven Pillars of Life”, *Science*, 295: 2215-2216, 2002. [Capítulo xxiv en esta edición.]

ciales aparecen en este caso; por ejemplo, Schulze-Makuch¹⁰ ofrece una lista de paralelismos inorgánicos de varios criterios supuestamente distintivos de la vida, como el metabolismo, el crecimiento, la reproducción y la adaptación al medio ambiente.

Sin embargo, la importancia práctica de la cuestión filosófica de la definición de la 'vida' se ha incrementado ahora que los experimentos en el laboratorio se plantean la síntesis de la vida (la 'vida' según los criterios de algunas definiciones) y que aumenta cada vez más el interés en la búsqueda de la vida en Marte¹¹ y en la luna Europa de Júpiter.¹² En particular, las definiciones de la 'vida' con frecuencia incluyen explícita o implícitamente los proyectos de la búsqueda *in situ* de la vida extraterrestre. El diseño de los experimentos de detección de la vida que se habrán de realizar en Europa¹³ o en Marte¹⁴ depende de las decisiones sobre lo que es la vida, y sobre cuáles pruebas se tomarán en cuenta para detectarla.¹⁵ Una clara ilustración de esta cuestión es la historia de la búsqueda de la vida en Marte por la misión espacial Viking.

La búsqueda de vida en Marte de la misión Viking

La búsqueda de la vida en Marte que ha realizado la misión espacial Viking sigue siendo hasta la fecha la única búsqueda dedicada específicamente a la detección *in situ* de la vida extraterrestre. El planteamiento básico consistió en llevar a cabo experimentos en el suelo marciano para comprobar la existencia de organismos metabolizadores, y de hecho los resultados del experimento de liberación marcada, en particular, fueron semejantes a los esperados en relación con la presencia de la vida.¹⁶ Pero al final el equipo de biólogos del proyecto Viking se adhirió a una interpretación no biológica de los resultados en la que influyó mucho que el

¹⁰ D. Schulze-Makuch *et al.*, *op. cit.*

¹¹ W. T. Sullivan y J. A. Baross, *Planets and Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 2007, capítulo 18.

¹² *Ibid.*, capítulo 19.

¹³ Por ejemplo, C. F. Chyba y C. B. Phillips, "Possible Ecosystems and the Search for Life on Europa", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98: 801-804, 2001; C. F. Chyba y C. B. Phillips, "Europa as an Abode for Life", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 32: 47-68, 2002.

¹⁴ Por ejemplo, N. H. Neelson y P. G. Conrad, "Life: Past, Present and Future", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 354: 1923-1939, 1999; J. F. Banfield *et al.*, "Mineralogical Biosignatures and the Search for Life on Mars", *Astrobiology*, 1 (4): 447-465, 2001; P. G. Conrad y K. H. Neelson, *op. cit.*

¹⁵ W. T. Sullivan y J. A. Baross, *op. cit.*, capítulos 22 y 23.

¹⁶ G. V. Levin y P. A. Straat, "Completion of the Viking Labeled Release Experiment on Mars", *Journal*

aparato de cromatografía de gases-espectrometría de masas (GC-MS) no hubiera encontrado ningún tipo de moléculas orgánicas en el suelo marciano dentro de su rango de detección experimental, con un calentamiento de las muestras de hasta 500 °C.¹⁷ No se había concebido este instrumento para realizar un experimento de “detección de la vida”, pero de hecho lo hizo, empleando implícitamente una definición bioquímica. Sin embargo, el GC-MS no hubiera podido detectar siquiera $\sim 10^6$ células bacterianas por gramo de polvo,¹⁸ y hoy se sabe que la oxidación de las sustancias orgánicas meteoríticas en la superficie marciana pudo haber producido compuestos orgánicos no volátiles difícilmente detectables.¹⁹ Ya fueran, o no, interpretados correctamente, los resultados fueron psicológicamente potentes: ninguna sustancia orgánica (detectada), ningún tipo de vida. Chyba y Phillips²⁰ han extraído de los experimentos realizados una lista de enseñanzas: una de ellas es que cualquier búsqueda *in situ* de la vida extraterrestre debería basarse en más de una definición de la vida, a fin de que sea posible comparar los resultados entre sí.

Claro, si realmente hubiera *una* definición de la “vida” correcta, ésta sería una estrategia innecesaria. En la actualidad, la definición darwiniana es al parecer la más aceptada. Nosotros seguidamente examinaremos esta definición, pero habremos de concluir que más que proporcionarnos una definición irrefutable nos presenta nuevos dilemas.

La definición darwiniana

Las definiciones darwinianas (a veces llamadas *genéticas*) afirman que la vida es “un sistema capaz de experimentar la evolución mediante la selección natural”.²¹ Una versión práctica de la misma que goza de cierta popularidad en el campo del

of Molecular Evolution, 14: 167-183, 1979; G. V. Levin y R. L. Levin, “Liquid Water and Life on Mars”, *Proceedings of SPIE — The International Society for Optical Engineering*, 3441: 30-41, 1998.

¹⁷ K. Biemann *et al.*, “The Search for Organic Substances and Inorganic Volatile Compounds in the Surface of Mars”, *Journal of Geophysical Research*, 82 (28): 4641-4658, 1977.

¹⁸ H. P. Klein, “The Viking Biological Experiments on Mars”, *Icarus*, 34: 666-674, 1978; D. Glavin *et al.*, “Detecting Pyrolysis Products from Bacteria on Mars”, *Earth and Planetary Science Letters*, 185: 1-5, 2001; J. Bada, “State-of-the-Art Instruments for Detecting Extraterrestrial Life”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98: 797-800, 2001.

¹⁹ S. A. Benner *et al.*, “The Missing Molecules on Mars”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97: 2425-2430, 2000.

²⁰ C. F. Chyba y C. B. Phillips, “Possible Ecosystems and the Search for Life on Europa”, *op. cit.*, y “Europa as an Abode for Life”, *op. cit.*

²¹ C. Sagan, *op. cit.*

origen de la vida es la “definición química darwiniana”,²² según la cual la “vida es un sistema químico automantenido que es capaz de experimentar la evolución darwiniana”.²³ Joyce²⁴ dice que la “noción de la evolución darwiniana supone los procesos de la autorreproducción, la continuidad material a lo largo de un linaje histórico, la variación genética y la selección natural. El requisito de que el sistema se pueda automantener se relaciona con el hecho de que los sistemas vivientes contienen toda la información genética necesaria para su propia producción constante (es decir, el metabolismo)”. La definición química darwiniana excluye la “vida” computacional o artificial, exigiendo que el sistema bajo consideración sea “químico”, y también excluye los virus biológicos con base en el requisito del “automantenimiento”.

Por otra parte, algunos investigadores no limitan la evolución darwiniana a los sistemas químicos,²⁵ dejando abierta explícitamente la posibilidad de la vida computacional. Esto refleja la idea funcionalista de que la evolución darwiniana es un proceso más general, el cual se puede abstraer de cualquier elaboración física en particular.²⁶ Según esta idea, no sería la computadora la que estuviera viva, sino el proceso mismo. El estatus de esos vehículos artificiales que son las computadoras y que han sido producidos por los seres humanos, no resulta distinto al estatus de los utensilios de vidrio artificiales que podrían utilizarse en la síntesis experimental de la vida orgánica. No resulta sorprendente que con base en esta idea sea posible crear mediante una computadora sistemas o ecosistemas “vivos”.²⁷

Sin embargo, también esta idea podría parecer insuficiente: la simulación computacional de la bioquímica celular equivale a una simulación de la bioquímica, pero no a la bioquímica misma. Por ejemplo, ninguna simulación computacional de la fotosíntesis equivale a la fotosíntesis real, puesto que no produce auténticos carbohidratos; produce, en el mejor de los casos, simulaciones de los

²² C. F. Chyba y G. D. McDonald, *op. cit.*

²³ G. F. Joyce, “Forward”, *op. cit.*; G. F. Joyce, “The RNA World: Life before DNA and Protein”, en B. Zuckerman y M. Hart (comps.), *Extraterrestrials: Where are They? II*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995, pp. 139-151.

²⁴ G. F. Joyce, “Forword”, *op. cit.*

²⁵ Por ejemplo, R. Dawkins, “Universal Darwinism”, en D. S. Bendall (comp.), *Evolution from Molecules to Men*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983, pp. 422-425; D. Dennet, *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meaning of Life*, Simon & Schuster, Nueva York, 1995.

²⁶ Por ejemplo, E. Sober, “Learning from Functionalism — Prospects for Strong Artificial Life”, en C. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 2003, pp. 749-765.

²⁷ Véase, por ejemplo, S. Rasmussen, “Aspects of Information, Life, Reality, and Physics”, *Artificial Life*, 2: 767-774, 1992; T. S. Ray, “An Approach to the Synthesis of Life”, *Artificial Life*, 2: 371-408, 1992.

carbohidratos. ¿Por qué habría de llamarse ‘vida’, en vez de *simulación* de la vida, a una simulación computacional de la ‘vida’? De acuerdo con la idea funcionalista, la simulación *es* la vida, porque la vida es un proceso abstracto independiente de cualquier realización física.

Hay todavía más problemas con las definiciones darwinianas, además del dilema relacionado con la “vida” computacional. Es posible (aunque las actuales teorías sobre el origen de la vida no lo respalden) que la primigenia vida celular en la Tierra o en algún otro planeta pasara por un periodo de reproducción sin una replicación de tipo ADN, durante la cual todavía no ocurriría la evolución darwiniana.²⁸ En esta hipótesis, los entes basados en proteínas y capaces de llevar a cabo el metabolismo, fueron anteriores al desarrollo de la replicación exacta basada en los ácidos nucleicos. Si fueran descubiertos tales entes en otro planeta, las definiciones darwinianas no los considerarían entes vivientes.

Hay por añadidura una objeción elemental a la definición darwiniana: los organismos que se reproducen sexualmente en nuestro mundo del ADN no evolucionan ellos mismos, de manera que muchos entes vivientes en nuestro mundo no serían ejemplos de la vida, según la definición darwiniana. La definición darwiniana se relaciona con un *sistema* que al menos debe contener más de un ente; según este razonamiento, la singular criatura de Victor Frankenstein²⁹ no representaría la vida, aunque fuera un ente viviente. Pero es necesario explicar esta resolución, precisando que constituye algo más que un intento *ad hoc* de desembarazar la definición de entes problemáticos que de otro modo serían calificados de ejemplos de vida, pero que le causan problemas a una definición específica.

Finalmente, existe una desventaja práctica en las definiciones darwinianas. En una búsqueda *in situ* de la vida en otros planetas, ¿cuánto tiempo tendríamos que esperar para que un sistema demostrara que es “capaz” de experimentar la evolución darwiniana y bajo qué condiciones?³⁰ Esta objeción, sin embargo, no es por sí misma decisiva, ya que una objeción de tipo operativo no representa una objeción en principio, y se podría encontrar la manera³¹ de hacer que la definición sea operativa.

²⁸ F. Dyson, *op. cit.*; B. M. Rode, “Peptides and the Origin of Life”, *Peptides*, 20: 773-786, 1999; M. New y A. Pohorille, “An Inherited Efficiencies Model of Non-Genomic Evolution”, *Simulation Practice and Theory*, 8: 99-108, 2000; A. Pohorille y M. New, “Models of Protocellular Structures, Functions, and Evolution”, en G. Palyi, C. Zucchi y L. Caglioli (comps.), *Frontiers of Life*, Elsevier, Nueva York, 2000, pp. 37-42.

²⁹ M. Shelley, *Frankenstein: Or the Modern Prometheus*, Mayor & Jones, Londres, 1818.

³⁰ G. R. Fleischaker, *op. cit.*

³¹ Véase L. Chao, “The Meaning of Life”, *Bioscience*, 50: 245-250, 2000.

Hemos enfocado las definiciones darwinianas porque en la actualidad están en boga, especialmente a la luz de los grandes éxitos del modelo del mundo del ARN para el origen de la vida.³² No obstante, como ya lo discutimos, todas las versiones populares de la definición darwiniana son susceptibles de cuestionamientos similares.

DEFINICIONES

A fin de entender las dificultades que enfrentan los intentos de definir la ‘vida’, vamos ahora a exponer el fondo filosófico de la naturaleza de la definición. Las definiciones se relacionan con el lenguaje y los conceptos. Por ejemplo, la definición ‘soltero’ significa ‘varón humano no casado’: no habla de los solteros, sino que explica el significado de una *palabra*, en este caso ‘soltero’, diseccionando el *concepto* que asociamos con ésta. Como lo muestra este ejemplo, toda definición consta de dos partes. El *definiendum* es la expresión que se define (‘soltero’) y el *definiens* es la expresión de la definición.

Variedades de la definición

Muchas cosas diferentes se consideran comúnmente como “definiciones”. En esta parte sólo discutiremos aquellas que son pertinentes para nuestra comprensión del problema de proporcionar una definición científicamente útil de la ‘vida’.³³

Las *definiciones lexicográficas* exponen los significados estándar de los términos mediante un vocabulario natural. Un ejemplo de esto serían las definiciones en un diccionario. En cambio, las *definiciones estipulativas* proponen de manera explícita nuevos significados, con frecuencia técnicos, de los términos. La siguiente definición estipulativa propone un nuevo significado para un viejo término: el ‘trabajo’ significa el producto de la magnitud de una fuerza activa y el desplazamiento debido a su acción. Las definiciones estipulativas también se utilizan para proponer términos inventados, por ejemplo, ‘electrón’ (que significa una unidad básica de la electricidad), o ‘gen’ (que significa una unidad básica de la herencia). A diferencia de las definiciones lexicográficas, las definiciones estipu-

³² W. Gilbert, “Origin of Life: The RNA World”, *Nature*, 319: 618, 1986; W. T. Sullivan y J. A. Baross, *op. cit.*, capítulos 6 y 8.

³³ Para una discusión más amplia de las definiciones, véase R. Audi (comp.), *The Cambridge Dictionary of Philosophy*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995.

lativas son arbitrarias, en el sentido de que en vez de utilizar los significados existentes de los términos, proponen de manera explícita nuevos significados.

Otro conocido tipo de definición es la *definición ostensiva*. Las definiciones ostensivas especifican el significado de un término mediante la mera indicación de unos cuantos ejemplos prototípicos que la *extensión* del término abarca; la extensión de un término es la clase de cosas a las cuales se puede aplicar. Un adulto que le explica a un niño el significado de la palabra ‘perro’ apuntando a un perro y diciendo “ése es un perro”, lo que hace es dar una definición ostensiva. Alguien que define ‘universidad’ como “una institución como la Universidad de Colorado, la Universidad de Stanford, la Universidad de Guadalajara y la Universidad de Cambridge”, también emplea una definición ostensiva.

Las *definiciones operativas* proporcionan un importante tipo de definición relacionado con el anterior. Al igual que las definiciones ostensivas, éstas explican los significados a través de ejemplos representativos. Sin embargo, no señalan ejemplos directamente, sino que especifican los procedimientos que pueden llevarse a cabo con una cierta cosa a fin de determinar si cae o no dentro del campo del *definiendum*. Un ejemplo de una definición operativa sería: “el ‘ácido’ es cierta cosa que hace que el papel tornasol se vuelva rojo”. El *definiens* especifica un procedimiento que puede utilizarse para determinar si una sustancia desconocida es o no es un ácido. Las definiciones operativas son particularmente importantes en nuestra discusión, ya que muchos astrobiólogos³⁴ han dicho que es necesario utilizar las definiciones operativas en las búsquedas de la vida extraterrestre. El problema con las definiciones operativas está en que no nos dicen mucho sobre lo que tienen en común las cosas abarcadas por el *definiendum*. El hecho de que el papel tornasol se vuelva rojo cuando se sumerge en un líquido no nos dice mucho sobre la naturaleza de la acidez; sólo nos dice que cierto líquido es una cosa llamada ‘ácido’. En otras palabras, las definiciones operativas difieren de las definiciones ostensivas sobre todo en la forma en que indican de manera indirecta, mediante “pruebas”, las cosas que el *definiendum* abarca, en vez de hacerlo mediante enumeraciones o gestos (como en el ejemplo del “perro”). Posteriormente regresaremos a este punto importante.

Las definiciones más informativas especifican el significado de los términos mediante el análisis de los conceptos, proporcionando un sinónimo no circular para el término que se define. En la filosofía, tales definiciones se conocen como *definiciones totales* o *completas*. Pero puesto que los filósofos a veces utilizan estas

³⁴ Por ejemplo, C. F. Chyba y G. D. McDonald, *op. cit.*; C. P. McKay, *op. cit.*; K. H. Nealson y P. G. Conrad, *op. cit.*, y P. G. Conrad y K. H. Nealson, *op. cit.*

expresiones para designar distinciones más sutiles, nosotros utilizaremos el término de *definición ideal*.

Las definiciones ideales

Las definiciones ideales explican el significado de los términos relacionándolo con expresiones que ya conocemos. Es por lo tanto importante que el *definiens* no utilice el término que se define (u otro semejante), pues de otra manera la definición sería *circular*. La definición de 'línea' como "un trayecto rectilíneo" sería un ejemplo de una definición explícitamente circular, mientras que un implícitamente circular sería la de 'causa' como "algo que produce un efecto". Alguien que no entendiera el significado de 'causa' tampoco entendería el significado de 'efecto', puesto que 'efecto' significa algo que se causa. Muchas definiciones lexicográficas adolecen del defecto de la circularidad, razón por la cual los filósofos desaprueban las definiciones de los diccionarios.

La definición de 'soltero' (como "varón humano no casado") con que iniciamos esta discusión es un ejemplo claro de una definición ideal. No es circular, ya que el concepto de un varón humano no casado no presupone el conocimiento del concepto de soltero. Así, el *definiens* proporciona un análisis informativo del significado de 'soltero'. Por ende, una definición ideal especifica el significado de un término haciendo referencia a una conjugación lógica de propiedades (no estar casado, ser un varón humano), a diferencia de la referencia a unos ejemplos representativos (la definición ostensiva) o a unos ejemplos relacionados con un procedimiento (la definición operativa). La conjugación de las descripciones determina la extensión del *definiendum* mediante la especificación de las condiciones necesarias y suficientes para su aplicación. Una *condición necesaria* para la aplicación dentro del campo abarcado por un término es una cuya ausencia hace que el término no sea aplicable, y una *condición suficiente* es una cuya presencia hace que el término sea totalmente aplicable.

Casi todas las definiciones que pretenden ser ideales se enfrentan a casos límites donde no se sabe con precisión si una cosa satisface o no la conjugación de los predicados proporcionados por el *definiens*. Un buen ejemplo sería la pregunta de si un niño de 10 años es o no un soltero. Además, si estos casos se resuelven mediante la utilización de condiciones adicionales (por ejemplo, adulto) al *definiens*, siempre habrá otros casos límites (por ejemplo, el estatus de los varones de 18 años). Los léxicos son imprecisos. Esto se demuestra claramente por el clásico ejemplo de tratar de diferenciar un hombre calvo de uno que no lo es mediante el

número de cabellos que tenga en la cabeza. El hecho de que no podamos especificar con claridad la diferencia no prueba que no haya una entre el ser calvo y el no serlo. Son raras las definiciones ideales que especifiquen tanto las condiciones necesarias como las suficientes. Sin embargo, si dejamos de lado el problema de los casos límites, con frecuencia podemos construir aproximaciones bastante aceptables. Si las definiciones de la ‘vida’ sólo se toparan con contraejemplos que no fueran más serios que los casos límites (por ejemplo, los virus), acaso no enfrentarían problemas insuperables. Pero sí se enfrentan a problemas más serios. Así como una buena definición de ‘soltero’ u ‘hombre calvo’ tiene que lidiar con los varones de 40 años no casados o con los hombres cuya cabellera es espesa, respectivamente, así una buena definición de la ‘vida’ tiene que lidiar con cristales de cuarzo y llamas de las velas, que (presumiblemente) es claro que no son ejemplos de vida.

*Los tipos naturales y las declaraciones
teóricas de identidad*

Las definiciones ideales especifican los significados mediante un análisis “completo” (dentro de los límites de la imprecisión) de los conceptos asociados con los términos. Funcionan bien con términos como ‘soltero’ o ‘quincena’ o ‘silla’, los cuales designan categorías cuya existencia depende solamente de los intereses y las preocupaciones humanos. Es difícil imaginar una respuesta mejor a la pregunta “¿Qué es un soltero?”, que “un varón humano adulto no casado”.

Pero las definiciones ideales no proporcionan buenas respuestas a las preguntas sobre la identidad de las *categorías naturales*, las categorías que la naturaleza esculpe, a diferencia de los intereses, preocupaciones y convenciones que los humanos hemos creado.³⁵ Este asunto es particularmente importante en nuestra discusión, ya que parece probable (pero no seguro) que la ‘vida’ sea una categoría natural, es decir, que el hecho de que un ente sea viviente o no represente un dato objetivo relacionado con el mundo natural. Por ejemplo, intentemos responder a la pregunta “¿Qué es el agua?” mediante la definición de la categoría natural ‘agua’. Uno podría intentar definir el agua con referencia a sus propiedades sensitivas, tales como su humedad, transparencia, carencia de olor y sabor, y a su capacidad

³⁵ Algunos filósofos de la ciencia (los conocidos como “antirrealistas”) rechazan en mayor o menor grado las alegaciones de que existen hechos, entes o leyes independientes de la mente y conocibles. Aquí no podemos entrar en el tema; para una introducción, véase R. Audi (comp.), *op. cit.*, y las referencias bibliográficas que él proporciona.

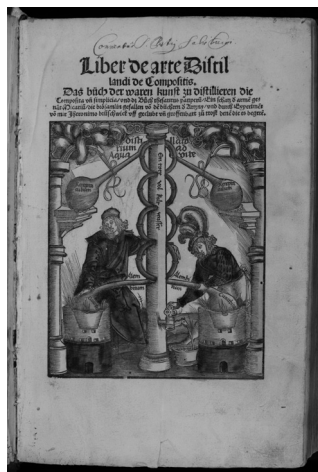


FIGURA XXVI.1. *Destilación del aqua vitae, una forma del “agua”.*

La ilustración original aparece en Hieronymus Braunschweig, Das Buch zu Distillieren, Estrasburgo, 1519, y la reproducción en G. Roberts, The Mirror of Alchemy: Alchemical Ideas in Images, Manuscripts and Books, University of Toronto Press, Toronto, 1994, p. 100; cortesía de la British Library.

para apagar la sed y ser un buen solvente. (Esta definición es análoga a algunas de las definiciones de la vida que se han propuesto, por ejemplo la de Koshland.)³⁶ No obstante, a diferencia de la definición de ‘soltero’, esta definición del ‘agua’ no es simplemente cuestión de una convención lingüística. La descripción de las propiedades sensitivas no debería excluir las cosas que se parecen al agua, pero que de hecho no son el agua. Por ejemplo, los alquimistas, impresionados por el poder del agua como solvente, llamaron *aqua fortis* (“agua fuerte”) al ácido nítrico, *aqua regia* (“agua regia”) al ácido clorhídrico, y *aqua vitae* (“agua de la vida”) a una mezcla de alcoholes³⁷ (figura xxvi.1). Incluso hoy en día clasificamos como “agua” varios líquidos cuyas propiedades sensitivas son muy distintas, por ejemplo, el agua salada, el agua lodosa y el agua destilada. ¿Cuáles son las propiedades sensitivas (la transparencia o la falta de sabor) más importantes de las diversas cosas que llamamos “agua”? Hace 500 años Leonardo da Vinci³⁸ describió bien esta cuestión:

Así, [el agua] es a veces aguda y a veces fuerte, a veces ácida y a veces amarga, a veces dulce y a veces espesa o delgada, a veces se cree que acarrea el daño o la pestilencia, a veces que aporta la salud, a veces que es venenosa. Así que uno diría que sufre cam-

³⁶ D. E. Koshland, *op. cit.*

³⁷ G. Roberts, *The Mirror of Alchemy: Alchemical Ideas in Images, Manuscripts and Books*, University of Toronto Press, Toronto, 1994.

³⁸ L. da Vinci, *II Codice Arundel*, núm. 263, fol. 57r, 1513, trad. de E. MacCurdy, citado por C. Witcombe (comp.), *Leonardo da Vinci and Water*, p. 734, <witcombe.sbc.edu/water/artleonardo.html> (agosto de 2008).

bios, adoptando tantas naturalezas diferentes como lo son los sitios por donde pasa. Y así como un espejo cambia según el color de su objeto, así cambia [el agua] según sea la naturaleza del lugar a través del cual pasa: salubre, ruidosa, laxativa, astringente, sulfurosa, salada, encarnada, doliente, iracunda, roja, amarilla, verde, negra, azul, grasosa, gorda, delgada.

Sin el conocimiento de la naturaleza subyacente del agua, no puede haber una respuesta definitiva a la pregunta “¿Qué es el agua?” Pero si se conoce la estructura molecular de la materia, el problema desaparece. El agua es H_2O —una molécula que consta de dos átomos de hidrógeno y un átomo de oxígeno—. La molécula de H_2O es lo que tienen en común el agua salada, el agua lodosa, el agua destilada, e incluso las soluciones ácidas, a pesar de sus obvias diferencias sensitivas. La equivalencia del agua con H_2O explica por qué algunos líquidos (por ejemplo, el ácido nítrico) que se parecen (en ciertos y obvios aspectos importantes) al agua, no son agua; su composición molecular es más compleja que la del H_2O . Además, esta equivalencia explica el comportamiento, dentro de una amplia gama de circunstancias químicas y físicas, de lo que llamamos “agua”. Esta equivalencia persiste a pesar de que el agua se encuentre en cualquiera de sus conocidos estados —el sólido, el líquido o el gaseoso— y también persiste en los estados sólidos menos conocidos que produce la alta presión. De hecho, antes de la aparición de la química moderna, por lo general no se sabía que el hielo, el vapor y el agua líquida eran distintos estados del mismo elemento. Algunos pensadores griegos de la Antigüedad (por ejemplo, Anaxímenes) creían que el vapor era una forma del “aire”.³⁹ Hasta el siglo XVII, se pensaba que el agua y el hielo eran dos “especies” distintas. La idea aristotélica del agua como uno de los cuatro elementos básicos que forman la materia sólo empezó a cuestionarse a finales del siglo XVIII en investigaciones como la de Antoine Lavoisier,⁴⁰ “Sobre la naturaleza del agua y los experimentos que prueban que esta sustancia no es en sentido estricto un elemento, sino que es susceptible a la descomposición y la recomposición”. Fue necesario algo más que el análisis de las propiedades sensitivas para solucionar definitivamente las cuestiones sobre la clasificación adecuada de sustancias tan obviamente distintas como el hielo y el vapor.

³⁹ G. E. R. Lloyd, *Early Greek Science: Thales to Aristotle*, Chatto & Windus, Londres, 1982, p. 22.

⁴⁰ A. Lavoisier, “On the Nature of Water and on Experiments which Appear to Prove that this Substance is not Strictly Speaking an Element but that is Susceptible of Decomposition and Recomposition”, trad. de C. Giunta. Disponible en <web.lemoyne.edu/~giunta/laveau.html> (agosto de 2008). Publicado originalmente en francés en *Observations sur la Physique*, 23: 452-455, 1783.

Hay que advertir que esta equivalencia del agua y el H_2O no tiene las características de una definición ideal. No explica el concepto que se ha asociado históricamente con el término 'agua', ya que este concepto abarca cosas cuya composición química y física es muy diversa. Además, en el habla cotidiana nosotros seguimos utilizando la palabra 'agua' para designar cosas que no se componen solamente de H_2O . La afirmación de que el agua es H_2O empezó como una conjetura empírica comprobable (situada en el nuevo marco teórico de la química lavoisierana) y hoy se considera como algo que se ha confirmado totalmente, tanto que para muchos científicos es un hecho. Sigue siendo, sin embargo, una hipótesis científica. Es concebible (aunque extraordinariamente improbable) que algún día descubramos que la actual teoría molecular se equivoca en algún sentido importante y que el agua no es H_2O , de la misma manera que hace un siglo Planck y Einstein demostraron que la teoría ondulatoria de la luz no era definitiva y que la luz también se comporta como una partícula. Si la afirmación de que el agua es H_2O representara una definición ideal, no podríamos admitir la posibilidad de que el agua pudiera no ser H_2O , mientras que no podemos admitir la posibilidad de que un soltero esté casado o de que una quincena contenga 30 días.

A veces se afirma que las declaraciones de identidad teórica, tales como "el agua es H_2O ", "la temperatura es energía cinética promedio" y "el sonido es una onda de compresión", en realidad representan definiciones estipulativas. No son más que decisiones lingüísticas que toman prestados del léxico común términos conocidos y les dan, en el contexto de una teoría aceptada, un significado técnico totalmente nuevo.⁴¹ El problema principal con este planteamiento es que nos impide entender la idea de que estas declaraciones nos dicen algo nuevo sobre las cosas que se han designado con el viejo término conocido ('agua', 'temperatura', 'sonido'). Con base en este planteamiento, en vez de aprender algo nuevo, simplemente vinculamos nuevos conceptos (identificamos descripciones) con viejos términos, y por lo tanto sólo cambiamos la forma en que nos referimos al mundo. Incluso alguien podría atreverse a decir que ésta es la forma en que el lenguaje funciona: si uno altera suficientemente el concepto asociado con una palabra, entonces uno ya no habla de la misma cosa. Sin embargo, esta idea, la cual se relaciona con el filósofo John Locke (y que utiliza Thomas Kuhn en su famoso argumento sobre el carácter inconmensurable de las teorías científicas), tiene serios problemas lógicos que por cierto examinamos detalladamente en los apéndices 1 y 2 al final de este capítulo. Por lo tanto, la mayoría de los filósofos contemporá-

⁴¹ E. Nagel, *The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation*, Brace & World, Nueva York, 1961.

neos rechazan la idea de que las declaraciones teóricas de identidad sean definiciones estipulativas. Algunas de las modificaciones del sentido de una vieja palabra resultan del descubrimiento de que estábamos equivocados sobre el fenómeno conocido que la palabra designa; para más detalles, véase el apéndice 3. Para decirlo más concretamente, sabemos algo sobre el agua que Aristóteles y Anaxímenes no sabían: el agua no es un elemento primigenio, sino un compuesto molecular.

¿QUÉ ES LA VIDA?

Regresemos ahora a la definición de la ‘vida’. Si (como parece probable, pero no seguro) la vida es una categoría natural, entonces los intentos por definir la ‘vida’ están fundamentalmente desencaminados. Las definiciones sólo sirven para explicar conceptos que actualmente asociamos con términos conocidos. En cuanto que son entes mentales humanos, los conceptos no pueden revelar la naturaleza objetiva subyacente (o la carencia de tal naturaleza) de las categorías designadas como categorías naturales. Pero cuando utilizamos un término que expresa una categoría natural, lo que nos interesa realmente es esa naturaleza subyacente (no los conceptos en nuestra mente). El ‘agua’ significa esa cosa que tienen en común los ríos, lagos, océanos y *todo lo demás* que sea agua. Actualmente creemos que tal cosa es el H_2O , y nuestra creencia se basa en una bien confirmada teoría científica general sobre esa materia. Claro que no podemos estar totalmente seguros de que la teoría molecular haya identificado definitivamente la naturaleza de la materia; en la ciencia simplemente no es posible probar cualquier cosa *definitivamente*. Sin embargo, el actual concepto científico del agua como H_2O representa un avance enorme en relación con los conceptos anteriores que se basaban en la experiencia sensorial superficial. Si algún día descubrimos que la teoría molecular es errónea, tendremos que cambiar el concepto que asociamos con el ‘agua’, pero de todos modos seguiremos hablando de la misma cosa.

Así como el ‘agua’, la ‘vida’ significa esa cosa que tienen en común las cianobacterias, las arqueobacterias hipertermófilas, las amibas, los hongos, las palmeras, las tortugas marinas, los elefantes, los seres humanos y *todo lo demás* que esté vivo (en la Tierra o en cualquier otro lugar del universo). Ninguna supuesta definición de la ‘vida’ puede proporcionar una respuesta científicamente satisfactoria a la pregunta “¿Qué es la vida?”, porque ningún análisis que utilice conceptos humanos puede revelar la naturaleza de un mundo que los trasciende. Únicamente podemos construir y probar empíricamente las teorías científicas sobre la natura-

leza general de los sistemas vivientes, teorías que solucionen nuestros dilemas clasificatorios mediante la explicación de casos enigmáticos: por qué ciertos entes vivientes a veces carecen de ciertos aspectos que asociamos con la vida, y por qué ciertos entes no vivientes a veces poseen ciertos aspectos que asociamos con la vida. Ninguna teoría científica puede ser definitiva, pero acaso algún día tengamos una bien confirmada, aceptablemente general, teoría de la vida que nos permita formular una declaración teórica de identidad que proporcione una respuesta científicamente satisfactoria a la pregunta “¿Qué es la vida?”

Los sueños de una teoría general de la vida

Para formular una declaración teórica de identidad sobre la vida, primero necesitamos una teoría general de los sistemas vivientes. El problema es que actualmente tan sólo tenemos una muestra de la vida, es decir, la vida terráquea. Aunque sea enorme la diversidad morfológica de la vida terráquea, la bioquímica de toda la vida conocida en la Tierra es extraordinariamente similar. Con la excepción de algunos virus, la materia hereditaria de toda la vida conocida en la Tierra es el ADN con la misma quiralidad derecha. Además, la vida en la Tierra utiliza 20 aminoácidos para construir las proteínas, y éstos tienen una quiralidad izquierda. Tales similitudes bioquímicas nos han llevado a concluir que la vida en la Tierra tuvo un solo origen. La evolución darwiniana ha explicado cómo pudo producir esa estructura bioquímica común una tan asombrosa diversidad de formas de vida. Aunque las similitudes bioquímicas de toda la vida en la Tierra se pueden explicar por el hecho del origen único, es difícil decidir cuáles son los aspectos de la vida terráquea comunes en *toda* la vida, dondequiera que se encuentre. Muchos de los aspectos bioquímicos que actualmente nos parecen importantes (porque toda la vida terráquea los comparte) acaso se deriven de meras contingencias químicas o físicas que tuvieron lugar cuando la vida se originó en la Tierra.⁴² Si no tenemos una teoría general de los sistemas vivientes, ¿cómo distinguir entre lo contingente y lo esencial? Es un poco como el intento de elaborar una teoría de los mamíferos cuando sólo se puede estudiar a las cebras. ¿Cuáles serían los aspectos de las cebras que se enfocarían: las manchas de su piel, comunes en todas, o las glándulas mamarias que sólo son características en las hembras? De hecho, las glándulas mamarias, aunque sólo las tengan algunas de las cebras, nos dicen

⁴² C. Sagan, “The Origin of Life in a Cosmic Context”, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 5: 497-505, 1974.

más sobre lo que significa ser un mamífero que las marcas que son comunes en todas. Si no conocemos entes vivos con un origen histórico distinto al nuestro, resulta difícil y acaso finalmente imposible formular una teoría aceptablemente general de la naturaleza de los sistemas vivos.

Este problema no se limita a la vida, sino que refleja una sencilla cuestión lógica. No es posible generalizar a partir de un solo ejemplo. Es la asombrosa diversidad de la vida en la Tierra actual, lo que hace que parezca diferente el caso de la vida. Podemos caer en la trampa de pensar que la vida terráquea nos proporciona una amplia diversidad de muestras de vida diferentes. Sin embargo, el análisis bioquímico, junto con el conocimiento sobre la evolución, nos ha revelado que la mayor parte de esta diversidad se debe a accidentes históricos. Si la historia de la Tierra hubiera sido diferente, la vida en la Tierra hoy sería sin duda diferente. “¿Qué tan diferente?” Ésta es una pregunta crucial en la astrobiología. Es algo que simplemente no se puede definir hasta que no exista una teoría general de los sistemas vivos. El origen común de la vida terráquea contemporánea esencialmente nos impide considerar las posibles características de la vida universal.

Un vistazo a algunas de las definiciones de la ‘vida’ más populares ilustra el problema de intentar identificar la naturaleza de la vida sin poder basarse en un marco teórico aceptablemente general de los entes vivos. Muchas definiciones⁴³ citan las propiedades de la vida terráquea —aspectos tales como el metabolismo, la reproducción, la estructura jerárquica compleja y la autorregulación—. Pero definir la ‘vida’ con base en las propiedades sensitivas es lo mismo que definir el ‘agua’ como una sustancia húmeda, transparente, sin sabor, sin olor, que calma la sed y que es un buen solvente. Como ya vimos, la indicación de las propiedades sensitivas no es capaz ni de excluir las cosas que no son agua (por ejemplo, el ácido nítrico), ni de incluir todo lo que el agua es (por ejemplo, el hielo). Similarmente, este tipo de planteamiento es incapaz de definir la ‘vida’.⁴⁴

Las definiciones de la ‘vida’ que no citan las propiedades sensitivas tienen el defecto de ser demasiado generales. Buen ejemplo de esto son las definiciones de la ‘vida’ que se basan en la termodinámica. Como antes, es difícil excluir los sistemas que obviamente no son sistemas vivos (por ejemplo, los cristales) sin proponer a su vez conceptos *ad hoc*.⁴⁵ Así, la definición “darwiniana química” que anteriormente comentamos excluye los casos problemáticos (tales como la vida

⁴³ Por ejemplo, P. G. Conrad y K. H. Nealson, *op. cit.*; D. E. Koshland, *op. cit.*

⁴⁴ Para una discusión más amplia sobre la relación entre el concepto de la vida y los aspectos que utilizamos para identificarla, véase M. Lange, “Life, ‘Artificial Life’, and Scientific Explanation”, *Philosophy of Science*, 63: 225-244, 1996.

⁴⁵ C. F. Chyba y G. D. McDonald, *op. cit.*

artificial o computacional) mediante la simple especificación de que un ente debe ser un sistema químico a fin de que se pueda considerar como ente viviente. Si tuviéramos un marco teórico adecuado para la comprensión de la vida, podríamos evitar el problema de ser demasiado generales sin recurrir a conceptos *ad hoc*.

Las nuevas teorías científicas modifican las viejas clasificaciones, por ejemplo, unificando la masa y la energía como masa-energía, o dividiendo el jade en dos minerales, la jadeíta y la nefrita. Una teoría general de los sistemas vivientes bien podría modificar nuestras actuales clasificaciones de los sistemas vivientes y los sistemas no vivientes. Estas modificaciones en la clasificación sólo serán convincentes si una teoría general de los sistemas vivientes empíricamente comprobada puede explicar, por ejemplo, por qué un sistema que anteriormente veíamos como un sistema no viviente es realmente un sistema viviente, o viceversa.⁴⁶ Pero para poder estar en situación de formular tal teoría se requerirá una diversidad más amplia de ejemplos de vida. Representan pasos importantes en esta dirección las actuales investigaciones experimentales (por ejemplo, la investigación del hipotético “mundo del ARN” prebiótico en la Tierra) y las búsquedas empíricas de formas de vida extraterrestre. Hasta que no se formule tal teoría, no podremos saber si puede existir o no tal declaración teórica de identidad.

Cómo buscar vida extraterrestre

Nos queda el problema de cómo buscar la vida extraterrestre sin una definición de la ‘vida’ o sin una teoría general de los sistemas vivientes. Una forma de hacerlo sería considerar como *criterios tentativos* de la vida (a diferencia de los criterios definitorios) los aspectos que actualmente empleamos para definir la vida terráquea. Por lo tanto, estos aspectos no son categóricos; su inexistencia no es suficiente para concluir que un ente carece de vida. Por lo tanto, no pueden proporcionar definiciones útiles de la ‘vida’ (en el sentido estricto del término). El propósito de utilizar criterios tentativos no consiste en solucionar definitivamente la cuestión de que si un ente carece o no de vida, sino más bien en enfocar los sistemas posiblemente vivientes, sobre todo los sistemas físicos cuya condición como sistemas vivientes o no vivientes realmente es dudosa. Por lo tanto, los criterios deben incluir una amplia variedad de los aspectos de la vida terráquea. Esta diversidad de los aspectos resulta absolutamente crucial cuando se investi-

⁴⁶ Otras posibilidades serían la de *tres* categorías de la vida distintas, o la de *ninguna* categoría distinta (sino más bien un fenómeno continuo).

gan las posibles pruebas de la vida extraterrestre muy antigua; por ejemplo, en el meteorito marciano ALH84001, o en las planicies marcianas o en los “estanques” congelados de Europa. Algunos de los aspectos que se deben incluir en las búsquedas de la vida extraterrestre (ya sea extinta o vigente) acaso no sean universales en la vida terráquea. Por ejemplo, ciertos aspectos que sólo se encuentran en las formas de vida de algunos medios terráqueos podrían ser más útiles en la búsqueda de la vida en medios extraterrestres similares, que los aspectos que son universales en la vida terráquea. De manera similar, ciertos aspectos que no son comunes o que no existen en los sistemas no vivientes terráqueos, incluso si no son universales en los sistemas vivientes, podrían constituir buenos criterios para identificar la vida presente o pasada porque se destacarían contra el fondo de unos procesos no vivientes. Buen ejemplo de esto son las cadenas de cristales de magnetita químicamente puros que se han descubierto en el meteorito ALH84001. Si llega a establecerse (lo cual es todavía bastante controvertido) que estas cadenas sólo pueden producirse biogenéticamente (excepto en circunstancias que muy probablemente jamás se darían en la naturaleza), entonces habrían de proporcionar una buena biofirma de la vida, a pesar del hecho de que la mayoría de las bacterias terráqueas no las produzcan.

La idea fundamental de nuestra estrategia para la búsqueda de la vida extraterrestre consiste en utilizar criterios empíricamente bien fundados, aunque provisionales, que incrementen la probabilidad de identificar la vida extraterrestre, al mismo tiempo que minimicen las posibilidades de una desorientación debida a las definiciones inadecuadas. Aunque tomando más en cuenta las limitaciones de las “definiciones”, esto es en principio similar a las propuestas de que las búsquedas *in situ* de la vida extraterrestre deberían basarse, siempre que fuera posible, en definiciones de la vida diferentes.⁴⁷ A diferencia de los planteamientos que enfocan una definición preferida, nuestras sugerencias acaso estén más cercanas a la estrategia propuesta por Nealson y sus colegas, quienes (a pesar de utilizar demasiado la palabra “definición”) enfatizan la utilización de diversas biofirmas (las atmosféricas, las hidrosféricas y las litosféricas).⁴⁸ Sin embargo, el punto importante es que nuestra estrategia se ha diseñado deliberadamente para sondear las fronteras de nuestro concepto actual de la vida. Sólo de esta manera podremos avanzar más allá de la idea de la vida centrada en la vida terráquea,

⁴⁷ C. F. Chyba y C. B. Phillips, “Possible Ecosystems and the Search for Life on Europa”, *op. cit.*, y “Europa as an Abode of Life”, *op. cit.*

⁴⁸ P. G. Conrad y K. H. Nealson, *op. cit.*; M. Storrie-Lombardi *et al.*, “Hollow Cathode Ion Laser for Deep Ultraviolet Raman Spectroscopy and Fluorescence Imaging”, *Review of Scientific Instruments*, 72: 4452-4459.

a fin de poder identificar la vida extraterrestre genuinamente extraña, si hemos de tener la fortuna de encontrarla. Y sólo podremos reunir las pruebas empíricas que se requieren para formular una teoría verdaderamente general de los sistemas vivientes si abrimos a las posibilidades imprevistas las fronteras de nuestro concepto de la vida.

APÉNDICE 1: LA TEORÍA DEL SIGNIFICADO DE LOCKE

La idea de que las declaraciones teóricas de identidad representan definiciones estipulativas se apoya en una problemática teoría del significado del filósofo del siglo XVII John Locke.⁴⁹ Según esta teoría, el significado de *cualquier* vocablo de un idioma se explica completamente por los conceptos vinculados al significado, y estos conceptos se identifican con descripciones. En algunas de las versiones de esta teoría, los conceptos se analizan como grupos (en vez de conjugaciones lógicas) de descripciones. El frecuentemente citado análisis al que Wittgenstein sometió el significado de la palabra ‘juego’ es una buena ilustración de esto.⁵⁰ Las cosas (por ejemplo, el ajedrez, los solitarios, el polo acuático, las charadas) que llamamos “juegos” son extraordinariamente variadas, tanto que es muy improbable que cualquier conjugación de descripciones pudiera distinguir entre todo lo que es un juego y todo lo que no es un juego. Wittgenstein concluye que no existen las condiciones necesarias y suficientes para que un juego sea un juego. Según él, lo que diferencia a los juegos de las cosas que no son juegos, es el parentesco: si una cosa posee las suficientes propiedades pertinentes, entonces es un juego. Pero ya sea que los conceptos se identifiquen con grupos o con conjugaciones de descripciones, la cuestión de si una cosa queda o no incluida en la extensión de un término se determina totalmente por el hecho de que se ajuste o no a las descripciones que usualmente asociamos con el término. De ahí que cualquier cosa que se ajuste a nuestro concepto usual del agua equivalga al “agua”. Si nuestro concepto del agua se fundara totalmente en las propiedades sensitivas, y si las propiedades sensitivas que consideraríamos más importantes no excluyeran el ácido nítrico, entonces no sólo calificaríamos de “agua” al ácido nítrico (lo cual en el pasado

⁴⁹ J. Locke, *An Essay Concerning Human Understanding*, Oxford University Press, Oxford, 1689. Para una discusión de la filosofía de John Locke, véase S. P. Schwartz, “Introduction”, en *Naming, Necessity, and Natural Kinds*, Cornell University Press, Ithaca, 1977, pp. 13-41.

⁵⁰ L. Wittgenstein, *Philosophical Investigations*, Macmillan, Nueva York, 1953; S. P. Schwartz, *op. cit.*

alguna vez hicimos), sino que, desde el punto de vista lockeano, el ácido nítrico realmente *sería* agua. Según este punto de vista, no habría posibilidad alguna de descubrir que estábamos equivocados —que nuestras descripciones eran demasiado inclusivas o exclusivas— puesto que lo único que indica que una cosa cae dentro de la extensión de un término es el hecho de que se ajuste o no a las descripciones que asociamos con el término. Si cambiáramos nuestro concepto del agua, especificando en el contexto de una nueva teoría, que el agua es H_2O , entonces ya no estaríamos hablando de la misma cosa. Así, no podemos decir que Aristóteles, para quien el agua era un elemento indivisible, hablaba de la misma cosa que nosotros cuando utilizamos el vocablo ‘agua’, porque para nosotros el agua es un compuesto de átomos de hidrógeno y oxígeno.

La teoría de Locke no es capaz de distinguir entre las categorías naturales y las categorías no naturales. Locke lo sabía muy bien; su solución consistió en aferrarse a su teoría, rechazando esa distinción. En un pasaje revelador, Locke⁵¹ alega que el debate del siglo XVII en torno a la cuestión de si los murciélagos eran o no aves tenía poca validez científica, ya que los conceptos (del siglo XVII) del murciélago y el ave son compatibles con cualquiera de las dos opiniones; para Locke, el debate era simplemente verbal. Pero en retrospectiva esto parece erróneo. La cuestión de si los murciélagos son o no aves no es meramente verbal —una cuestión de cuál descripción decidimos asociar con ‘murciélago’ o ‘ave’—. De hecho, hemos *descubierto* que los entes que llamamos “murciélagos” son más parecidos a los mamíferos que a las aves. Resulta instructivo comparar esta situación con el argumento análogo respecto a si los solteros podrían estar casados. Nadie podría descubrir que los solteros pudieran estar casados. Cualquier persona que pretendiera haberlo hecho no habría entendido el significado de ‘soltero’ o, alternativamente, simplemente especificaría (*vs.* descubriría) un nuevo significado para ‘soltero’. En otras palabras, el debate sobre si los solteros pueden estar casados *es* puramente verbal. Una adecuada teoría del significado debería poder explicar la diferencia entre los nombres comunes, tales como ‘murciélago’ y ‘soltero’.

⁵¹ J. Locke, *op. cit.*, libro III, capítulo XI, sección 7.

APÉNDICE 2: JOHN LOCKE Y THOMAS KUHN

La idea lockeana del significado subyace en el famoso argumento de Kuhn sobre el carácter inconmensurable de las teorías científicas.⁵² Según la teoría lockeana, cuando las descripciones definitorias asociadas con un término cambian de manera radical, como sucede en las revoluciones científicas, también cambia el significado del término. Así, el término 'masa' en la mecánica newtoniana (en la que la masa se conserva) significa algo radicalmente diferente de lo que significa en la teoría especial de la relatividad (en que sólo la masa-energía se conserva). Consecuentemente, no podemos decir que la teoría especial de la relatividad nos diga nada nuevo sobre la cosa a que se refiere el viejo término de 'masa'. Según Kuhn, en vez de ampliar nuestro conocimiento del mundo natural, las nuevas teorías sólo modifican nuestro marco conceptual. Pero esta conclusión no parece correcta. ¡Indudablemente hoy conocemos más sobre el mundo natural que hace 100 años!

Para nosotros es evidente la insuficiencia del marco lockeano. Una teoría del significado exitosa debe explicar los elementos indiscutibles del lenguaje y del pensamiento; al fin y al cabo, el lenguaje y el pensamiento *son* el objeto de una teoría del significado. Es innegable que cuando hablamos de y pensamos en las categorías naturales, no lo hacemos de la misma manera que cuando se trata de las categorías convencionales. Puesto que considera que el significado de *todo* término es *sólo* una cuestión convencional que depende únicamente de los conceptos que asociamos con él, la perspectiva lockeana no puede admitir esta diferencia en el pensamiento; carece de los recursos para explicarla.

APÉNDICE 3: UNA NUEVA TEORÍA DEL SIGNIFICADO

En la filosofía contemporánea, una nueva teoría del significado ha cuestionado la perspectiva lockeana.⁵³ Esta nueva teoría soluciona los problemas de la anterior mediante la eliminación del proyecto de identificar los significados con los conceptos, ya sea que éstos se interpreten como conjugaciones de significados o como grupos de significados.

⁵² T. S. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, The University of Chicago Press, Chicago, 1962.

⁵³ Véase una discusión en P. Schwartz, *op. cit.*

Hay diversas versiones de la nueva teoría del significado. Todas, sin embargo, están de acuerdo en que el significado implica una referencia, y en que ésta no se determina por los conceptos. El vocablo ‘agua’ significa todo lo que posee la misma naturaleza subyacente que la sustancia que usualmente llamamos “agua”, sin que importen las descripciones que usualmente asociamos con esta palabra. Aunque es innegable que utilizamos las descripciones (derivadas de nuestras experiencias sensorias con casos paradigmáticos) para identificar como agua ciertas sustancias, estas descripciones no determinan (como en la perspectiva lockeana) lo que hace que alguna cosa *sea* agua. Por lo tanto, cierta cosa puede ajustarse a las descripciones que asociamos con el ‘agua’, pero no la podemos calificar de agua porque su naturaleza subyacente es otra.

Un conocido experimento mental de Hilary Putnam,⁵⁴ uno de los fundadores de la nueva teoría, ilustra esta cuestión. Putnam nos pide que supongamos que existe un planeta llamado “Tierra Gemela”. La Tierra Gemela es como la Tierra, pero el líquido que en la Tierra llamamos “agua”, en la Tierra Gemela no es H₂O, sino un líquido distinto cuya fórmula se abrevia como “XYZ”. El H₂O y el XYZ poseen las mismas propiedades sensitivas; el XYZ es un líquido húmedo, transparente, sin olor, sin sabor, buen solvente. En el experimento mental de Putnam, los habitantes de la Tierra Gemela en el siglo xvii y los de la Tierra en el mismo siglo (antes de la aparición de la teoría molecular) tienen el mismo concepto del agua. Un habitante de la Tierra en el siglo xvii bien hubiera podido creer que existía el agua en la Tierra Gemela. Pero hubiera sido un error. El líquido que existía en la Tierra Gemela parecía ser agua pero no lo era porque no era H₂O, aunque los habitantes de ambos planetas no hubieran podido entender esto hasta el final del siglo xviii.

Es importante entender el sentido del experimento mental de Putnam. El hecho de que sea poco científico hablar de un planeta Tierra Gemela que sea exactamente como la Tierra, excepto por la composición química del agua, no es pertinente en su argumento. Lo que Putnam hace es señalar algo sobre el lenguaje y los conceptos. El lenguaje se utiliza para describir muchos tipos de situaciones, desde las reales a las hipotéticas (por ejemplo, ¿qué hubiera pasado si Al Gore hubiera ganado la presidencia en 2003?), hasta las fantásticas (por ejemplo, las aventuras del joven aprendiz de brujo Harry Potter). Una teoría aceptable del significado debe abarcar las situaciones hipotéticas y fantásticas, tanto como las rea-

⁵⁴ H. Putnam, “Meaning and Reference”, *Journal of Philosophy*, 70: 699-711, 1973; H. Putnam, “The Meaning of Meaning”, en H. Putnam, *Mind, Language and Reality: Philosophical Papers*, vol. II, Cambridge University Press, Cambridge, 1975, pp. 215-271.

les. El experimento mental de Putnam sobre la Tierra Gemela demuestra que el significado de un término que expresa una categoría natural no se capta totalmente mediante las descripciones que asociamos con el término. Si se captara, tendríamos que concluir que el habitante terráqueo del siglo XVII estaba en lo correcto respecto a la existencia del agua en la Tierra Gemela.

Ya tenemos las herramientas para evaluar la propuesta de que las declaraciones teóricas de identidad (por ejemplo, “el agua es H_2O ”) son definiciones estipulativas. Tanto en la vieja como en la nueva teoría del significado, las definiciones se interesan únicamente en el lenguaje y en los conceptos. Si las declaraciones como “el agua es H_2O ” equivalen a definiciones estipulativas, entonces (*à la* Kuhn) nada nuevo nos dicen sobre el mundo de la naturaleza. No representan más que las decisiones lingüísticas de vincular conceptos (H_2O) derivados de marcos teóricos (la teoría molecular) con viejos términos conocidos (‘agua’). Pero esta interpretación no hace justicia a la forma en que pensamos y hablamos sobre las declaraciones teóricas de identidad: nosotros las tomamos para hacer que se puedan someter a prueba (que se puedan invalidar) las afirmaciones sobre el viejo mundo conocido de la experiencia. En la vieja y problemática teoría del significado no se podía explicar este aspecto de nuestra estructura conceptual y de nuestra práctica lingüística. En consecuencia, los debates científicos sobre la naturaleza subyacente de las categorías naturales tenían que interpretarse como algo puramente verbal (por ejemplo, el análisis de Locke respecto a la cuestión de si los murciélagos son o no son aves). La nueva teoría del significado restaura la conexión entre el lenguaje y el mundo, permitiéndonos entender nuestras intuiciones sobre el estatus empírico contingente de las identidades teóricas.

En vez de ver las declaraciones teóricas de identidad como definiciones estipulativas, es más correcto entenderlas como conjeturas empíricas —en el contexto de una teoría científica bien confirmada— sobre un conjunto de cosas que en el habla común se ven como una categoría natural. Las identidades teóricas son contingentes en el sentido de que algún día descubriremos que son falsas (aunque parezca improbable en algunos casos). Además, es importante tener presente que no hay ninguna garantía de que nuestras mejores teorías científicas moldearán el mundo exactamente como lo hace el lenguaje natural. Por ejemplo, la jadeíta y la nefrita alguna vez se conjuntaron en el término usual de ‘jade’, pero hoy gracias a los análisis químicos y a la microscopía se sabe que son diferentes:⁵⁵ el término ‘jade’ no designa a una (sola) categoría natural. Similarmente, en el con-

⁵⁵ M. Bauer, *Precious Stones II*, Dover, Nueva York, 1969; H. Putnam, “The Meaning of Meaning”, *op. cit.*

texto del marco teórico apropiado, acaso descubriremos que lo que considerábamos como categorías naturales diferentes son realmente parte de la misma categoría natural. Citando otro ejemplo, proveniente de la mineralogía, hoy sabemos que los rubíes y los zafiros, a pesar de sus notables diferencias, pertenecen a la misma categoría natural, la del corindón (Al_2O_3).⁵⁶ En una palabra, cuando una vieja teoría se remplaza con una nueva teoría, no simplemente cambiamos de tema y empezamos a hablar de algo enteramente distinto. Aprendemos algo nuevo sobre un viejo tema conocido, y esto puede significar que descubramos que nuestro lenguaje y nuestros conceptos nos han engañado.

BIBLIOGRAFÍA

- Adami, C., *Introduction to Artificial Life*, Springer, Nueva York, 1998.
- Aristóteles, *De Anima*, en R. McKeon (comp.), *The Basic Works of Aristotle*, Random House, Nueva York, 1941. [Versión en español: *Acerca del alma*, trad., notas, pról. e introd. de M. D. Boeri, Colihue, Buenos Aires, 2010.]
- Audi, R. (comp.), *The Cambridge Dictionary of Philosophy*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995. [Versión en español: *Diccionario Akal de filosofía*, trad. de Huberto Marraud y Enrique Alonso, Akal, Madrid, 2004.]
- Bada, J., “State-of-the-Art Instruments for Detecting Extraterrestrial Life”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98: 797-800, 2001.
- Banfield, J. F., J. W. Moreau, C. S. Chan, S. A. Welch y B. Little, “Mineralogical Biosignatures and the Search for Life on Mars”, *Astrobiology*, 1 (4):447-465, 2001.
- Bauer, M., *Precious Stones II*, Dover, Nueva York, 1969.
- Bedau, M., “The Nature of Life”, en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Oxford, 1996, pp. 332-357.
- Benner, S. A., K. Devine, L. Matveeva y D. Powell, “The Missing Molecules on Mars”, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97: 2425-2430, 2000.
- Biemann, K., J. Oró, P. Toulmin III, L. E. Orgel, A. O. Nier, D. M. Anderson, P. G. Simmonds, D. Flory, A. V. Díaz, D. R. Rushneck, J. E. Biller y A. L. Lafleur, “The Search for Organic Substances and Inorganic Volatile Compounds in the Surface of Mars”, *Journal of Geophysical Research*, 82 (28): 4641-4658, 1977.
- Chao, L., “The Meaning of Life”, *Bioscience*, 50: 245-250, 2000.

⁵⁶ M. Bauer, *op. cit.*

- Chyba, C. F., y G. D. Mcdonald, "The Origin of Life in the Solar System: Current Issues", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 215-249, 1995.
- Chyba, C. F., y C. B. Phillips, "Europa as an Abode of Life", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 32: 47-68, 2002.
- , "Possible Ecosystems and the Search for Life on Europa", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98: 801-804, 2001.
- Cleland, C. E., "Historical Science, and Scientific Method", *Geology*, 29: 978-990, 2001.
- , "Methodological and Epistemic Differences between Historical Science and Experimental Science", *Philosophy of Science*, 69: 474-496, 2002.
- Cleland, C. E., y C. F. Chyba, "Defining 'Life'", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 32: 387-393, 2002.
- Conrad, P. G., y K. H. Nealson, "A Non-Earth-Centric Approach to Life Detection", *Astrobiology*, 1: 15-24, 2001.
- Dawkins, R., "Universal Darwinism", en D. S. Bendall (comp.), *Evolution from Molecules to Men*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983, pp. 422-425.
- Dennet, D., *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meaning of Life*, Simon & Schuster, Nueva York, 1995. [Versión en español: *La peligrosa idea de Darwin: evolución y significados de la vida*, trad. de Cristóbal Pera Blanco-Morales, Galaxia Gutenberg, España, 1990.]
- Dyson, F., *Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985. [Versión en español: *Los orígenes de la vida*, trad. de Ana Grandal, Cambridge University Press, Madrid, 1999.]
- Feinberg, G., y R. Shapiro, *Life beyond Earth: Intelligent Earthlings' Guide to the Universe*, William Morrow, Nueva York, 1980.
- Fleischaker, G. R., "Origins of Life: An Operational Definition", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 20: 127-137, 1990.
- Gilbert, W., "Origin of Life: The RNA World", *Nature*, 319: 618, 1986.
- Glavin, D., M. Schubert, O. Botta, G. Kminek y J. Bada, "Detecting Pyrolysis Products from Bacteria on Mars", *Earth and Planetary Science Letters*, 185: 1-5, 2001.
- Harold, F. M., "Postscript to Schrödinger: So What is Life?", *American Society for Microbiology News*, 67: 611-616, 2001.
- Joyce, G. F., "Forward", en D. Deamer y G. Fleischaker (comps.), *Origins of Life: The Central Concepts*, Jones & Bartlett, Boston, 1994, pp. xi y xii.
- , "The RNA World: Life before DNA and Protein", en B. Zuckerman y M. Hart (comps.), *Extraterrestrials: Where are They?, II*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995, pp. 139-151.
- Kamminga, H., "Historical Perspective: The Problem of the Origin of Life in the Context of

- Developements in Biology”, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 18: 1-11, 1988.
- Kauffman, S. A., *Investigations*, Oxford University Press, Oxford, 2000.
- Klein, H. P., “Did Viking Biology Discover Life on Mars?”, *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 29: 161-165, 1979.
- , “Simulation of the Viking Biology Experiments: An Overview”, *Journal of Molecular Evolution*, 14: 161-165, 1979.
- , “The Viking Biological Experiments on Mars”, *Icarus*, 34: 666-674, 1978.
- Koshland, D. E., “The Seven Pillars of Life”, *Science*, 295: 2215-2216, 2002. [Capítulo xxiv en esta edición.]
- Kuhn, T. S., *The Structure of Scientific Revolutions*, The University of Chicago Press, Chicago, 1962. [Versión en español: *La estructura de las revoluciones científicas*, ensayo preliminar de I. Hacking, trad. e introd. de C. Solís Santos, 4ª ed., FCE, México, 2013.]
- Lahav, N., *Biogenesis: Theories of Life's Origins*, Oxford University Press, Nueva York, 1999, pp. 117-121.
- Lange, M., “Life, ‘Artificial Life’, and Scientific Explanation”, *Philosophy of Science*, 63: 225-244, 1996.
- Lavoisier, A., “On the Nature of Water and on Experiments Which Appear to Prove that this Substance is Not Strictly Speaking an Element but that is Susceptible of Decomposition and Recomposition”, trad. de C. Giunta. Disponible en: web.lemoyne.edu/~giunta/laveau.html (agosto de 2008). Publicado originalmente en francés en *Observations sur la Physique*, 23: 452-455, 1783.
- Levin, G. V., y R. L. Levin, “Liquid Water and Life on Mars”, *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 3441: 30-41, 1998.
- Levin, G. V., y P. A. Straat, “Completion of the Viking Labeled Release Experiment on Mars”, *Journal of Molecular Evolution*, 14: 167-183, 1979.
- Lloyd, G. E. R., *Early Greek Science: Thales to Aristotle*, Chatto & Windus, Londres, 1982, p. 22. [Versión en español: *De Tales a Aristóteles*, trad. de C. E. Gondell, Eudeba, 1977.]
- Locke, J., *An Essay Concerning Human Understanding*, Oxford University Press, Oxford, 1689. [Versión en español: *Ensayo sobre el entendimiento humano*, trad. de E. O’Gorman, 2ª ed., FCE, México, 1999.]
- MacCurdy, E., *The Notebook of Leonardo da Vinci*, Old Konecky & Konecky, Saybrook, 2003.
- Matthews, G. B., “Consciousness and Life”, *Philosophy*, 53: 13-26, 1977.
- Mayr, E., *The Growth of Biological Thought*, Belknap Press, Cambridge, 1982.
- McKay, C. P., “Origins of Life”, en J. Shirley y R. Fairbridge (comps.), *Van Nostrand Reinhold Encyclopedia of Planetary Sciences and Astrogeology*, Van Nostrand, Nueva York, 1994, pp. 387-391.

- Monod, J., *Chance and Necessity: An Essay on the Natural Philosophy of Modern Biology*, Knopf, Londres, 1971. [Versión en español: *El azar y la necesidad. Ensayo sobre la filosofía natural de la biología moderna*, Tusquets, Barcelona, 1981.]
- Nagel, E., *The Structure of Science: Problems in the Logic of Scientific Explanation*, Brace & World, Nueva York, 1961. [Versión en español: *La estructura de la ciencia: problemas de la lógica de la investigación científica*, trad. de Néstor Míguez, Paidós, Barcelona, 2006.]
- Nealson, N. H., y P. G. Conrad, "Life: Past, Present and Future", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 354: 1923-1939, 1999.
- New, M., y A. Pohorille, "An Inherited Efficiencies Model of Non-Genomic Evolution", *Simulation Practice and Theory*, 8: 99-108, 2000.
- Pohorille, A., y M. New, "Models of Protocellular Structures, Functions, and Evolution", en G. Palyi, C. Zucchi y L. Caglioli (comp.), *Frontiers of Life*, Elsevier, Nueva York, 2000, pp. 37-42.
- Putnam, H., "Meaning and Reference", *Journal of Philosophy*, 70: 699-711, 1973.
- , "The Meaning of Meaning", en *Mind, Language and Reality: Philosophical Papers*, vol. II, Cambridge University Press, Cambridge, 1975, pp. 215-271.
- Rasmussen, S., "Aspects of Information, Life, Reality, and Physics", *Artificial Life*, 2: 767-774, 1992.
- Ray, T. S., "An Approach to the Synthesis of Life", *Artificial Life*, 2: 371-408, 1992.
- Rizzoti, M. (comp.), *Defining Life*, Padova University Press, Padua, 1996.
- Roberts, G., *The Mirror of Alchemy: Alchemical Ideas in Images, Manuscripts and Books*, University of Toronto Press, Toronto, 1994.
- Rode, B. M., "Peptides and the Origin of Life", *Peptides*, 20: 773-786, 1999.
- Sagan, C., "Life", en *Encyclopædia Britannica*, vol. xv, Encyclopædia Britannica, Chicago, 1970.
- , "The Origin of Life in a Cosmic Context", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 5: 497-505, 1974.
- Schrödinger, E., *What is Life? The Physical Aspects of the Living Cell*, Cambridge University Press, Cambridge, 1945. [Versión en español: *¿Qué es la vida?*, Tusquets, Barcelona, 1997.]
- Schulze-Maluch, D., H. Guan, L. Irwin y E. Vega, "Redefining Life: An Ecological, Thermodynamic, and Bioinformatic Approach", en G. Palyi, C. Zucchi y L. Caglioli (comps.), *Fundamentals of Life*, Elsevier, Nueva York, 2002, pp. 169-179.
- Schwartz, S. P., "Introduction", en *Naming, Necessity, and Natural Kinds*, Cornell University Press, Ithaca, 1977, pp. 13-41.
- Shapiro, R., y G. Feinberg, "Possible Forms of Life in Environments very Different from

- the Earth”, en B. Zuckerman y M. Hart (comps.), *Extraterrestrials: Where are They?*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995, pp. 165-172.
- Shelley, M., *Frankenstein: Or the Modern Prometheus*, Mayor & Jones, Londres, 1818.
- Shields, C., *Order in Multiplicity*, Oxford University Press, Oxford, 1999.
- Sober, E., “Learning from Functionalism — Prospects for Strong Artificial Life”, en C. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 2003, pp. 749-765.
- Storrie-Lombardi, M. C., W. F. Hug, G. D. McDonald, A. I. Tsapin y K. H. Nealson, “Hollow Cathode Ion Lasers for Deep Ultraviolet Raman Spectroscopy and Fluorescence Imaging”, *Review of Scientific Instruments*, 72 (12): 4452-4459, 2001.
- Sullivan, W. T., y J. A. Baross, *Planets and Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- Vinci, L. da, *II Códice Arundel*, núm. 263, fol. 57r, 1513, trad. de E. MacCurdy, citado por C. Witcombe (comp.), *Leonardo da Vinci and Water*, p. 734, witcombe.sbc.edu/water/artleonardo.html (agosto de 2008).
- Wittgenstein, L., *Philosophical Investigations*, trad. de E. Anscombe, Macmillan, Nueva York, 1953. [Versión en español: *Investigaciones filosóficas*, trad. de Alfonso García Suárez y Ulises Mousines, UNAM, México, 1988.]

Lynn Margulis y Dorion Sagan*

XXVII. SINFONÍA DE LOS SENTIDOS

Por la imperfección del lenguaje, al vástago se le llama nuevo animal; pero éste, en verdad, es una rama o prolongación del progenitor, ya que una parte del embrión animal es o ha sido una parte del progenitor y, por tanto, estrictamente hablando, a éste no se le puede calificar de totalmente nuevo en el momento de su producción y, por ende, éste posiblemente conserve algunos de los hábitos del sistema del progenitor.

ERASMUS DARWIN

Dicen que el hábito representa una segunda naturaleza. ¿Quién puede saber si la naturaleza no es más que un primer hábito?

BLAISE PASCAL

El pensar y el ser son la misma cosa.

PARMÉNIDES**

UNA VIDA DUAL

¿Qué es la vida? Dos de sus aspectos cruciales son que la vida se produce (auto-mantiene autopoiéticamente) y se reproduce a sí misma. Luego también está el cambio heredado: la mutación del ADN y los cromosomas, la simbiosis y la fusión sexual, en combinación con la selección natural, determinan el cambio evolutivo. Sin embargo, la autopoiesis, la reproducción y la evolución apenas abarcan una parte de la totalidad de la vida.

* Este capítulo apareció originalmente como el capítulo 9 del libro de L. Margulis y D. Sagan, *What is Life?*, University of California Press, Berkeley, 2000, pp. 213-243. © Néвраumont Publishing Company, Inc.

** Los epígrafes provienen originalmente de E. Darwin, *Zoonomia; or, the Laws of Organic Life*, Johnston, Londres, 1794; B. Pascal, *Pensées*, Penguin, Nueva York, 1995, y L. Tarán, *Parmenides: A Text with a Translation, Commentary, and Critical Essays*, Princeton University Press, Princeton, Nueva Jersey, 1965.

Hemos entrevisto maneras de describir lo que es la vida: un proceso material que navega sobre la materia como una extraña, lenta ola; una exuberancia planetaria; un fenómeno solar —la transmutación astronómicamente localizada en la Tierra del aire, el agua y la luz solar a fin de crear las células—. La vida puede verse como un intrincado esquema de crecimiento y muerte, comunicación y retraimiento, transformación y decadencia. Conectada a través del tiempo darwiniano con las primeras bacterias y a través del espacio vernadskiano con todos los ciudadanos de la biosfera, la vida es una sola red que se extiende indefinidamente. La vida es la materia desatada y desquiciada, capaz de elegir su propio camino a fin de retrasar el inevitable acaecer del equilibrio termodinámico —la muerte—. La vida es también una pregunta, en la forma de un ser humano, que el universo se hace a sí mismo.

La vida se manifiesta en la Tierra como cinco reinos que revelan cada uno desde un ángulo distinto este misterio de los misterios. En un sentido muy real, la vida consiste en las bacterias y su progenie. Toda la tierra disponible en este planeta está habitada por los súbditos del reino Monera: los inspirados productores, los transformadores tropicales, los exploradores polares. La vida es también el extraño nuevo fruto de individuos creados por simbiosis. Distintos tipos de bacterias se combinaron para producir protistas. Cuando protistas de la misma especie se combinaron entre sí el resultado fue el sexo meiótico. Evolucionó la muerte programada. Los agregados multicelulares se convirtieron en animales, plantas y hongos individuales. Así, la vida no es siempre divergencia y discordancia, sino también la unión de entes disimilares para formar nuevos seres. Además la vida no se detuvo en las células complejas y los seres multicelulares. Siguió adelante, forjando sociedades y comunidades y la biosfera viviente misma.

La vida es la materia pensante en movimiento, el poder de las poblaciones en expansión. Es la diversión, la precisión, la malicia del reino animal —el cual es una maravilla de invenciones para enfriar y calentar, mover y afirmar, acechar y evadir, cortejar y engañar—. Es la percepción y la sensibilidad; es la conciencia e incluso la autoconciencia. La vida, contingencia histórica y astuta curiosidad, es la fluida aleta y el ala desplegada del ingenio animal; es la vanguardia de la biosfera viviente, el *avant garde* representado por los miembros del reino animal.

La vida es la transmigración de la materia, en la cual los hongos cierran el ciclo de los ciclos, produciendo materia comestible a partir de los desechos animales y vegetales. La vida habita bajo la tierra y la podredumbre, tanto como en

los asoleados paisajes que gozan los seres fotosintéticos. La vida es una red de alianzas entre los reinos con la participación sutil, aparentemente taimada, del reino Mycota. Es una orgía de atracciones, desde las engañosas “flores” falsificadas de los hongos hasta las auténticas delicias de las trufas y los alucinógenos.

La vida es la transmutación de la energía y la materia. El fuego solar se transmuta en el fuego verde de los seres fotosintéticos. El fuego verde se transforma en el fuego sexual rojo y amarillo y violeta de las plantas florecientes, especialistas en la seducción entre los reinos. El fuego verde fosilizado se guarda celosamente en el cubículo humano de la economía solar. La vida es una incesante química de disipación del calor. Y la vida es memoria —memoria en acción, la repetición química del pasado—.

Estas descripciones tentativas se acercan pero no llegan a una definición definitiva de la vida. Nosotros no pronunciaremos la última palabra, ningún juicio final, porque la vida se trasciende a sí misma; evade cualquier definición. En la cotidiana adaptación y el aprendizaje diario, en las acciones y las evoluciones a largo plazo, en las interacciones, en los avances y desarrollos conjuntos, los seres orgánicos van más allá de sí mismos, en el sentido de que se convierten en algo más de lo que ya son. Almacenando y redistribuyendo las energías solares, la vida despliega niveles cada vez más altos de actividad y complejidad. ¿Quién puede saber qué podría hacer de sí misma la vida cuando se expanda para convertir en hogar una parte más extensa del universo?

Todos los organismos viven numerosas vidas. Una bacteria satisface sus necesidades en el lodo salado de una marisma, pero al mismo tiempo también modifica el medio ambiente al cambiar la composición de la atmósfera. Como miembro de la comunidad biológica consume los desechos de un vecino y genera los alimentos de otro. Un hongo hace su tarea entre los detritos de una selva cuando perfora la hoja de un árbol cercano y ayuda a cerrar el ciclo del flujo biosférico del fósforo. Desde un punto de vista, nosotros, los humanos, somos mamíferos comunes; desde otro, una nueva fuerza planetaria.

Al igual que otros animales, nosotros comemos, orinamos, defecamos, copulamos; como ellos, descendemos de conglomerados de bacterias y protistas meióticos fertilizadores. Como otras especies de los mamíferos, el *Homo sapiens* podría perdurar acaso unos dos millones de años más, ya que el tiempo de vida promedio de las especies mamíferas en la era Cenozoica es de menos de tres millones de años. Todas las especies desaparecen: se extinguen o se bifurcan a fin de formar dos o más especies descendientes. Ninguna especie animal del periodo Cámbrico sobrevive hoy.

Acaso el *Homo sapiens* se dividirá en dos especies divergentes que serán tan distintas de lo que somos hoy como nosotros lo somos de los chimpancés, los *Pan troglodytes*. Esta bifurcación podría acelerarse por la tecnología. Descendientes de los humanos con un sistema nervioso confinado en caparazones robóticos durables, montados en naves espaciales interplanetarias podrían ser capaces de observar con ojos telescópicos las emisiones de los rayos X provenientes de las estrellas. Acaso algunos ex humanos podrán liberar a sus genes de las enfermedades hereditarias o superar —gracias a la manipulación genética— el nivel de inteligencia normal. Otros, habitantes de planetas de mayor o menor gravedad, podrían experimentar un aumento o una pérdida de peso espectacular, habiéndose modificado su masa ósea y su sistema respiratorio, y reordenado sus órganos internos.

Son ilimitadas las posibilidades que podamos imaginar. Pero, a pesar de lo que lleguemos a ser, nuestros sucesores retendrán vestigios del pasado, es decir, de nuestro presente. Incluso en el caso de que una nueva arma biológica hubiera de vaporizar instantáneamente todas nuestras células, “nosotros” no desapareceríamos. Como fantaseó Clair Folsome (1932-1988):

Lo que permanecería sería una imagen fantasmal, la piel delineada por el fulgor de las bacterias, los hongos, los vermes, los parásitos y demás habitantes microbianos. Los intestinos se verían como un tubo atestado de bacterias anaeróbicas y aeróbicas, levaduras y otros microorganismos. Si uno pudiera escrutar los restos, cientos de tipos de virus aparecerían a través de todos los tejidos. Estamos lejos de ser especiales. Cualquier animal o planta se mostraría igualmente como un hervidero de microbios, un zoo microbiano similar.¹

Más de 98% de nuestros genes se corresponden con los de los chimpancés. Sudamos líquidos que recuerdan el agua de mar. Codiciamos el azúcar que le proporcionó energía a nuestros ancestros más de 3 000 millones de años antes de que la primera estación espacial se construyera. Cargamos nuestro pasado en el cuerpo.

Pero ahora, congregados en ciudades electrónicas, los humanos han empezado a instrumentar y transformar la vida en escala planetaria. Algunos futuristas afirman que nos hemos liberado de la evolución animal. ¿Somos algo más que monos pretensiosos vestidos a la moda? ¿No es cierto que poseemos la música, el lenguaje, la cultura, la ciencia y la tecnología computacional?

¹ C. Folsome, “Microbes”, en T. P. Snyder (comp.), *The Biosphere Catalogue*, Synergetic Press, Oracle, 1985, pp. 51-56.

Cuando Katherine Hepburn le regaña por haberse emborrachado y comportado como un patán, en la película *La reina africana*, Humphrey Bogart descarta la responsabilidad de haberlo hecho, diciendo: “Un hombre a veces bebe un poco de más; es su naturaleza humana”.

“La *naturaleza* —dice la pudibunda Hepburn, bajando su Biblia y alzando la vista— es lo que Dios puso en la Tierra para que la *superemos*”.

La vida que se trasciende a sí misma jamás oblitera su pasado: los humanos son animales que son microbios que son sustancias químicas. La idea de que seamos “más” que los animales no contradice la perspectiva materialista que apunta a la ciencia. La vida es menos mecanicista de lo que nos han enseñado a creer; sin embargo, no es vitalista, puesto que no desobedece ninguna ley química o física. Aunque sintamos que poseemos un gran nivel de libertad, todos los demás seres, incluidas las bacterias, también eligen acciones que tienen consecuencias ambientales. Almacenada y transformada en vida, la energía del sol nutre las células, el sexo y la reproducción de todas las formas de vida, todas muy similares entre sí. Acaso todos los entes vivientes compartimos el mismo sentimiento de libre voluntad.

La vida en la Tierra es un complejo sistema químico que se basa en la fotosíntesis y se estructura fractal e individualmente en diferentes niveles organizativos. No podemos superar a la naturaleza, puesto que la naturaleza misma se supera y trasciende a sí misma.

La naturaleza no termina con nosotros, sino que avanza inexorablemente, traspasando las sociedades de los animales. Nos conectan los mercados globales y las comunicaciones mediante satélites que giran en torno a la Tierra, los teléfonos inalámbricos, las imágenes de resonancia magnética, las redes computacionales, la televisión de cable y otras tecnologías. De hecho, la gente ya forma un ser más que humano: una superhumanidad interdependiente, tecnológicamente interfusada. Nuestras actividades nos están conduciendo hacia algo que está tan más allá de las personas individuales como cada uno de nosotros está más allá de las células que componen nuestro cuerpo.

Hoy nos encontramos al final de las guerras frías y candentes de este siglo, y nos comunicamos libremente a través de las fronteras nacionales con la velocidad de la luz, mediante los teléfonos y las computadoras. Las noticias centellean a través del mundo. Pero los cambios sociales a inicios del nuevo milenio palidecen en comparación con los enormes cambios biológicos. Está por finalizar el eón Fanerozoico, en cuyos inicios, hace más de 500 millones de años, aparecieron los predadores y las conchas con que se defendieron muchas de las víctimas. Los mo-

vimientos evolutivos que crearon eucariotas a partir de las bacterias y animales a partir de los protistas, hoy se repiten en escala planetaria. La humanidad está pasando de ser una sociedad a ser un ente orgánico de otro nivel. Nuestras poblaciones están empezando a comportarse como el cerebro o el tejido neural de un ente global. Al convertirnos en sociedades más pobladas y sedentarias, nuestra inteligencia humana, ampliada por la tecnología, se está convirtiendo en una parte de la vida planetaria total.

Los hechos de la vida, las historias de la evolución, tienen el poder de unir a todos los pueblos. Mediante la integración de los datos de miles de científicos y mediante el cultivo de la duda y el escepticismo, meollo de la indagación científica, la invención cultural que llamamos ciencia podría proporcionar una más satisfactoria, aunque siempre corregible, descripción del mundo que la de los mitos parroquianos y las tradiciones religiosas divisorias que exigen la devoción total. Esto no significa que los científicos tengan siempre la razón. Pero la historia de la existencia más significativa para la humanidad futura probablemente provendrá más de la visión evolutiva y científica del mundo, que de las tradiciones religiosas hinduistas, budistas, judeocristianas o islámicas. La sabiduría dual de la indagación científica y los mitos de la creación podrían convertirse en una sola visión: un relato científico cuya riqueza se basara tanto en los hechos verificables como en la inspiración personal.

LA ELECCIÓN

En la psicología verdaderamente evolucionista, el espíritu y la mente no son regalos celestiales, sino elementos autónomos y soberanos de la materia viviente. El pensamiento no se deriva de otro mundo que el nuestro; proviene de la actividad de las células.

Cuando se les ofrece una variedad de alimentos, las bacterias nadadoras, los ciliados, los amastigotes y otros microbios móviles seleccionan lo que prefieren; eligen. Gracias a sus seudópodos retráctiles la *Amoeba proteus* avanza sinuosamente hasta engullir la deleitable *Tetrahymena*, rechazando las *Copromonas*. La *Paramecium* prefiere devorar los pequeños ciliados, pero si no encuentra estos y otros protistas, se contenta a desgana con las aeromonas y otras bacterias.

Aunque “simplemente” son protistas, los foraminíferos (uno de los grupos más diversos de los organismos que forman fósiles) fabrican una asombrosa variedad de magníficas conchas. Los foraminíferos, sin sus conchas, se parecen a las amibas con seudópodos largos y delgados. Hacen sus conchas con arena, creta,

espículos de esponjas, e incluso con otras conchas de foraminíferos. Para formar su hogar de concha celular, algunos foraminíferos aglutinan partículas minerales con un cemento orgánico. Se ha observado en el laboratorio que cuando se les ofrece una mezcla de partículas diferentes, los foraminíferos seleccionan algunas específicamente, según su forma y tamaño. Por ejemplo, los *Spiculosphon* sólo eligen entre el diversificado sedimento para hacer su concha los espículos de esponja.² Sin cerebro ni manos, estos resueltos protistas eligen sus materiales de construcción.

Más pequeñas aún, con una longitud de tan sólo dos micrones, las bacterias quimotácticas son capaces de sentir los cambios químicos. Nadan hacia el azúcar y evaden el ácido. Una bacteria quimotáctica puede detectar una diferencia de tan sólo una diezmilésima parte en la concentración química que existe en ambos extremos de su cuerpo.

El bioquímico Daniel Koshland describe así las tendencias espirituales de las células procariotas:

La “elección”, la “memoria”, el “aprendizaje”, el “instinto”, el “juicio” y la “adaptación” son términos que usualmente identificamos con los procesos neurales avanzados. Sin embargo, en cierto sentido se puede decir que las bacterias poseen todas estas propiedades [...] no sería inteligente concluir que las analogías son meramente semánticas, ya que aparentemente existen relaciones subyacentes en el mecanismo molecular y la función biológica. Por ejemplo, el aprendizaje en las especies superiores involucra complejas interacciones a largo plazo, pero ciertamente la formación enzimática inducida debe considerarse como uno de los más probables dispositivos moleculares para fijar algunas conexiones neurales y eliminar otras. Por tanto, la diferencia entre el instinto y el aprendizaje se convierte en una cuestión de escala temporal, no de principio.³

Los microbios sienten y evitan el calor, avanzan hacia la luz o la evaden. Algunas bacterias incluso detectan los campos magnéticos. En el interior de su minúsculo cuerpo alargado hay una fila de imanes (figura XXVII.1). Pensar que las bacterias son meras máquinas sin sensaciones ni conocimiento equivale a afirmar, como Descartes, que los perros no experimentan el dolor. Pensar que las

² S. J. Culver, “Foraminifera”, en J. H. Lipps (comp.), *Fossil Prokaryotes and Protists*, Blackwell Scientific Publications, Boston, 1993, p. 224.

³ D. E. Koshland, “A Response-Regulated Model in a Simple Sensory System”, *Science*, 196: 1055-1063, 1992.



FIGURA XXVII.1. Vestigio de una bacteria magnetotáctica que muestra magnetosomas internos (fotografía tomada con un microscopio electrónico).

Estas células son capaces de orientarse magnéticamente hacia el Polo Norte y el Polo Sur, y son un ejemplo de la sensibilidad de la sustancia viviente en todos los niveles, escalas y reinos. La percepción, la elección y la sensación no sólo existen en los seres humanos o en los animales, sino en todas las formas de vida de la Tierra.

bacterias perciben y actúan, pero no sienten, equivale a una especie de solipsismo. (El solipsismo es la idea de que todas las cosas del mundo, incluidas las otras personas, son una proyección de la propia imaginación.) Las células vivas probablemente perciben y sienten. Los protistas rechazan las esporas indigeribles y algunas bacterias, aunque devoran vorazmente otras. Aun en los niveles más primitivos, vivir al parecer implica la sensación, la elección, la mente.

Darwin hizo la distinción formal entre la “selección natural” (refiriéndose a las interacciones entre la vida no humana y el medio ambiente) y la “selección artificial” producida por los seres humanos (las selecciones estéticas o funcionales de los agricultores y de los criadores de palomas, perros y caballos). Pero en cierto sentido la selección “natural” es mucho más “artificial” —y mucho menos mecánica— de lo que Darwin creía. El medio ambiente no es inerte. La autoconciencia no se limita al espacio que existe entre nuestras orejas. Los seres no humanos eligen lo que quieren y todo organismo viviente influye en la vida de los demás organismos.

Se nos ha dicho que los seres humanos somos especiales. Nuestra postura es vertical (lo cual nos permite pensar que las demás especies se encuentran algo “debajo” de nosotros). Tenemos manos con pulgares independientes (el hombre fabrica y utiliza herramientas), habilidades lingüísticas (el hombre escribe y narra), un alma (según Descartes, los animales no la poseen). Nos hemos considerado tradicionalmente (al menos en la cultura occidental) como los regentes espirituales de toda la vida en la Tierra. Exista o no exista Dios, creemos que tenemos el derecho de destruir el planeta (mediante las armas nucleares) o de alterar su atmósfera y su clima de un día para otro.

Incluso un adversario ferviente de la idea de que la humanidad progresa gracias a la evolución, Stephen Jay Gould (y no es el único), dice que aunque los hu-

manos pueden evolucionar rápidamente mediante la “selección cultural”, todas las otras formas de vida en la tierra están encadenadas al antiguo, lento sistema de la “selección natural”. Pero la gran diversidad de rasgos que se enumeran para describir el carácter único y especial de los humanos es suficiente para despertar dudas al respecto. Entre la deslumbrante serie de razones que se aducen para apuntalar nuestra superioridad sobre el resto de la vida, se destaca un argumento científico que contrasta con los demás: los humanos son los únicos seres que tienen la capacidad de autoengañarse totalmente.

Esta afirmación se basa en la supuestamente ilusoria creencia en la vida después de la muerte que desde los tiempos primitivos los seres humanos han albergado. Antes de la historia escrita, nuestros ancestros enterraban a sus muertos con alimentos, armas y hierbas medicinales que para poca cosa le podían servir a un cadáver. ¡Resulta irónico que nosotros, buscando ejemplos de nuestra superioridad sobre el resto de los organismos vivientes, finalmente hayamos llegado a congratularnos por poseer un rasgo que casi niega la validez de todos los demás! Aunque los miembros de otras especies se engañan entre sí, los humanos somos expertos en el autoengaño: siendo los mejores utilizadores de símbolos, la especie más inteligente y la única que habla, también somos los únicos seres lo suficientemente avanzados como para engañarnos a nosotros mismos totalmente.

PEQUEÑAS RESOLUCIONES

La idea freudiana del inconsciente como represión —los recuerdos dolorosos se expulsan de la mente consciente— ha desviado la atención de otra forma en que las acciones se vuelven inconscientes. No es la evasión, sino el enfoque perdurable, lo que puede hacer que una acción se vuelva automática, inherente. Un discurso se “aprende de memoria”. Un mecanógrafo experimentado ya no tiene que mirar el teclado. Prácticamente todas las actividades se desvanecen en la mente consciente cuando se memorizan. El corazón bombea sangre, los riñones la filtran automáticamente, casi perfectamente. En relación con la respiración y la deglución, acciones usualmente automáticas, la voluntad humana puede ejercer cierto control y cierta modulación.

Ahora bien, he aquí un pensamiento extraño: acaso nosotros los mamíferos no somos conscientes de los procesos innatos de la fisiología porque, bajo las presiones de la supervivencia, nuestros ancestros conscientemente pulieron sus habilidades hasta alcanzar la perfección inconsciente en su práctica. Aunque la

ciencia moderna todavía no ha descrito un mecanismo que transmita los hábitos aprendidos por una generación, a la fisiología de la siguiente, la experiencia nos muestra que lo consciente puede convertirse en inconsciente mediante la acción repetitiva. El abismo entre nosotros y otros seres orgánicos es una cuestión de grado, no de tipo. En conjunto, la vasta sensibilidad consciente proviene de acumular las pequeñas resoluciones, los deseos y propósitos de trillones de predecesores autopoieticos que ejercieron opciones que influyeron en su evolución. Si a nuestros ancestros les otorgáramos incluso una minúscula fracción de la libre voluntad, la conciencia, y la cultura que nosotros los humanos tenemos, entonces sería más fácilmente explicable la progresiva complejidad de la vida en la tierra a lo largo de los pasados miles de millones de años: la vida no sólo es el producto de fuerzas físicas incontrolables, sino también de la selección, en el sentido de que los organismos eligen lo que les conviene. Todos los seres autopoieticos tenemos dos vidas: como dice la canción, la vida que se nos da y la vida que nos hacemos.

En el siglo XIX, Samuel Butler (1835-1902), autor inglés, pintor y músico, cuestionó la teoría de la evolución darwiniana. Butler no se llevaba bien con su padre, y al terminar sus estudios en Shrewsbury y St. John's College, Cambridge, partió a Nueva Zelanda para convertirse en ganadero de borregos. Allí leyó *El origen de las especies*, que al principio lo cautivó, pero luego, gradualmente, Butler quedó desilusionado con la obra. Él era un rebelde muy culto a quien le gustaba satirizar a la sociedad y estudiar el origen de las religiones. Aunque estaba de acuerdo con la idea de la evolución, rechazaba la versión que de ésta daba Darwin. Butler empezó a sospechar que en el avance de la ciencia existía un dogmatismo tan estricto como el de la Iglesia, pero todavía más insidioso. Leyó a los evolucionistas anteriores a Darwin, incluido el abuelo de éste, Erasmus Darwin, y acusó al joven Darwin de no reconocer sus deudas intelectuales.

Un maestro de Darwin en Shrewsbury había sido el famoso doctor Butler, abuelo de Samuel Butler. Butler el joven alegaba que Darwin pretendía saber poco de sus predecesores y que en las ediciones iniciales de *El origen de las especies*, tras haber regresado de su famoso viaje a las Galápagos, había hecho parecer que la teoría de la selección natural simplemente se le había “ocurrido”. Butler ridiculizó el “Esbozo histórico del progreso reciente de la opinión sobre el origen de las especies” que Darwin incluyó en la segunda (1860), tercera (1861) y cuarta (1886) edición de *El origen*. Darwin se había disculpado por este ensayo, diciendo que era “breve pero imperfecto”. Ya para la sexta y última edición (1872) sim-

plemente lo calificaba de “breve”, lo cual implicaba que el esbozo histórico acaso se había perfeccionado en ese lapso. Butler no estaba de acuerdo.

A Butler lo que más le irritaba era el mecanicismo del proceso evolutivo según Darwin. Éste, decía Butler irónicamente, “había eliminado la vida en la biología”. Para que su teoría de la evolución fuera aceptable en la devota era victoriana, Darwin tuvo que recurrir a un mecanismo científico convincente. Ya que el logro científico más respetado de la época era la física de Isaac Newton, Darwin describió la evolución de la misma manera que Newton lo había hecho con la gravedad, como el resultado de principios abstractos e interacciones mecánicas. Aunque es más conocido como el autor de *Erewhon* y de su obra póstuma, *The Way of All Flesh* [El camino de la carne] (una influyente indagación de las luchas entre las generaciones), para Butler su mayor logro fue la contribución que él hizo a la teoría de la evolución. Rechazando la forma en que Darwin presentaba a los seres orgánicos, como “entes” expuestos a “fuerzas”, Butler alegaba que la vida sensitiva había realizado innumerables decisiones minúsculas y que por lo tanto era en parte responsable de su propia evolución. Hoy esta idea del efecto acumulado de los pequeños propósitos sólo se aprueba en relación con los seres humanos. Nosotros nos consideramos como seres culturales que se proyectan mentalmente, capaces de revestir de carne el futuro sobre los huesos de la imaginación. Incluso pensamos que podemos gobernar la evolución. Creemos que el resto de la vida carece de esa visión prometeica. Vemos a los demás seres orgánicos como el resultado de fuerzas psiquicoquímicas o aleatoriamente genéticas, insinuando que son seres demasiado inertes como para desempeñar un papel constructivo en su propio desarrollo. Butler en absoluto estaba de acuerdo con esto.

Los bien afilados, brillantes y polémicos argumentos de Butler contrastaban con la sobria prosa científica de sus victorianos tiempos. Uno de sus temas resulta especialmente prominente: la materia viviente es mnemotécnica, recuerda e incorpora su propio pasado. Según él, la vida posee conciencia, memoria, dirección, metas; toda la vida, no sólo la humana, es teleológica —es decir, que se esfuerza en alcanzar cosas—. Butler afirmaba que los darwinianos habían pasado por alto la teleología, la manera en que la vida actuaba por y para sí misma, dirigiéndose hacia ciertas metas. Al descartar en la evolución una intervención divina, Darwin al mismo tiempo había desechado la voluntariedad viviente.

Ninguna bacteria fotosintética se decidió un día a convertirse en salsa. La *Amoeba proteus* hoy no busca convertirse en un ratón; sólo sabe que es sabrosa la *Tetrahymena* que persigue tercamente en el agua. El conocimiento de las amenazas en este nivel del sentir y del movimiento genera un millón de acciones volun-

tariosas semejantes. Éstas son suficientes para que la evolución produzca sus milagros.

Sólo en retrospectiva y en suma resultan grandiosos los propósitos de la vida. Son ordinarios cuando se ven de cerca y confinados en el tiempo. Pero ningún ser orgánico es una bola de billar impulsada por fuerzas externas. Todos los organismos son sensibles y todos poseen la teleología interna del imperativo autopoiético. Todos y cada uno son capaces, en un grado variable, de actuar por sí mismos.

LA BLASFEMIA DE BUTLER

En el segundo de los cuatro libros cuya publicación él mismo sufragó, Samuel Butler reapásó las ideas evolucionistas de Erasmus Darwin, Jean-Baptiste Lamarck, George Louis Leclerc Buffon, y otros. Su título, *Evolution, Old and New* [La evolución del pasado y del presente] (publicado en 1879) era por lo tanto adecuado. Mediante una serie de cartas y de ensayos que aparecieron en los periódicos, Butler hizo pública su crítica de la obra de Darwin, acusando al gran hombre de soslayar el crédito de su abuelo Erasmus y de mecanizar la vida. Butler incluso cuestionó la honestidad de Darwin. En su intento de reinsertar la vida en la biología, Butler esperaba que Darwin respondiera a su libro de 1879 o a un libro anterior, *Life and Habit* [La vida y el hábito] (1877).

Butler le preguntó a Darwin si sus ideas sobre la evolución habían sido el resultado de una inspiración sin precedentes que le había llegado del cielo. ¿Se debía simplemente a la reflexión con base en una gran cantidad de datos? Butler alegaba que el aura del poeta y evolucionista Erasmus Darwin, junto con la lectura y asimilación de muchas obras e ideas evolucionistas, tenían que haber contribuido también al desarrollo intelectual de Darwin. Acaso jamás se determinará si Darwin fue un sutil maestro de la autopromoción o Butler un paranoico de paciencia escolástica. Pero la naturaleza rebelde de Butler, en combinación con el prestigio creciente de Darwin como icono intelectual, le predispuso a sentirse desilusionado con el gran hombre. Por entonces salió a la luz una biografía de Erasmus Darwin. Había sido traducida del alemán y Darwin la había aprobado. Cuando la leyó, Butler se sorprendió desagradablemente al descubrir que la traducción al inglés del evolucionista francés Lamarck utilizaba precisamente los mismos términos que Butler había usado para traducir a Lamarck en su propio libro, *Evolution, Old and New*. También se decía en la obra que aquellos que querían revivir el pensamiento evolucionista anterior al de Charles Darwin mostraban “una debili-

dad intelectual y cierto anacronismo mental que nadie podría envidiar”. Butler pensó que se le estaba atacando oblicuamente en una forma que imposibilitaba el debate franco; creía que el mismo Darwin podía haber sido responsable del rechazo a las supuestamente anticuadas ideas evolucionistas del pasado. Se confrontó con Darwin, primero mediante una carta, y luego en un artículo periodístico. Darwin le escribió a Butler, alegando que ese tipo de defectos en una traducción, como los que habían aparecido en la biografía de su abuelo, eran tan comunes que “jamás se me ocurrió decir que el artículo había sido modificado”.

La familia de Darwin, y Thomas Huxley, le rogaron a Darwin que no respondiera a cualquier crítica de Butler, o a sus cartas. No lo hizo. Sin embargo, los registros biográficos muestran que hizo el borrador de dos respuestas, jamás enviadas. En el segundo borrador, Darwin decía: “Podría explicar específicamente cómo surgió el accidente, pero a mí no me parece que valga la pena dar la explicación. Siento mucho, como ya lo he dicho, esta omisión”.⁴ Es interesante que Darwin vacilara también en este caso entre dos formas de explicación que Butler habría de precisar concisamente en uno de sus libros como *Luck, or Cunning* [La suerte o la astucia]: por un lado, algo se olvida, hay una pérdida de memoria; por otro lado, hay un “accidente”, algo “se omite accidentalmente”. Incluso aquí vemos a Darwin vacilar, incapaz de determinar si un suceso —y, de hecho, uno por él causado— había sido el resultado de la aleatoriedad (la suerte, el “accidente”) o la astucia (la opción y el propósito), precisamente la teoría que Butler le acusaba de haber ignorado.

Nosotros estamos de acuerdo con Butler en que la vida es materia que elige sus preferencias. Todos y cada uno de los seres vivos, alegaba Butler, responden sensorialmente a los cambios de su medio ambiente y se esfuerzan en cambiarse a sí mismos durante su vida. Pero los seres vivos no pueden efectuar cambios eficientemente. Ningún mamífero optó repentinamente un día por convertirse en ser humano. Más bien, los sistemas vivos, por la necesidad ineludible de procurarse alimentos, agua y energía, se fueron transformando persistente y astutamente.

Lo que los teólogos llamaban el “diseño”, y consideraban divino, era para Butler el resultado, en parte, de la materia consciente, la materia ligada a la Tierra.

⁴ El relato más completo de estos poco conocidos sucesos lo hace H. F. Jones, “The Butler-Darwin Quarrel”, en H. F. Jones (comp.), *Samuel Butler, Autor of ‘Erewhon’ (1835-1902): A Memoir*, vol. II, Macmillan, Londres, 1919, pp. 446-447. La cita del “anacronismo mental” está en la p. 447; la de “jamás se me ocurrió”, en la p. 448, y “cómo surgió el accidente”, en la p. 425. Los fascinantes pero difíciles de encontrar “libros evolucionistas” de Butler —*Life and Habit; Evolution, Old and New*; y *Luck, or Cunning*— se encuentran en los volúmenes 4, 5 y 8, respectivamente, de H. F. Jones et al. (comps.), *The Shrewsbury Edition of the Works of Samuel Butler*, Nueva York, E. P. Dutton, 1924.

Pensemos en el caso de un escritor que se bloquea y no sabe bien lo que quiere escribir. Sin embargo, ateniéndose a la gramática, la ortografía, y la sintaxis; añadiendo palabra tras palabra, algo significativo aparece. El resultado literario no se debe enteramente a su labor porque se deriva de las reglas del lenguaje. Similarmente, ninguna forma de vida esquivas las leyes de la física, la química o la termodinámica. De la misma manera que las decisiones de los escritores existen en el mundo de la literatura, las decisiones de los seres vivientes existen en el mundo de la materia. Ninguna de las dos decisiones es absoluta, pero las estrictas leyes de la materia, por una parte, y del lenguaje, por la otra, imponen estructuras que permiten que surja un diseño general —no perfectamente terminado— que resulta de la acumulación de una gran cantidad de decisiones pequeñas e individuales.

Butler creía que los cambios diminutos efectuados por los organismos en su medio ambiente empezaban como propósitos conscientes, pero terminaban como prácticas inconscientes. Según Butler, las amebas también tienen sus pequeños deseos, sus pequeñas esferas de influencia, sus pequeñas “herramientas”, con las que modifican materialmente su medio ambiente, persiguen sus pequeñas metas y construyen sus pequeños hogares. Esta posibilidad no se excluye por la ciencia moderna. Niels Bohr (1885-1962), el físico danés y ganador del Premio Nobel, en una discusión de la sorprendente utilización por parte de los organismos de su “pasada experiencia en las reacciones a estímulos futuros”, sostenía que a pesar de los logros de la biología mecanicista basada en la física, era necesaria una descripción que incluyera la “intencionalidad”.

Tenemos que entender que la descripción y la comprensión de los fenómenos cuánticos no revelan ningún aspecto que indique que una organización de átomos sea capaz de adaptarse a su entorno, como vemos que lo hacen los organismos vivientes para su mantenimiento y evolución. Además, debe recalcarse que una explicación, exhaustiva en el sentido de la física cuántica, del movimiento de todos los átomos que se intercambian continuamente en el organismo, no sólo es irrealizable, sino que obviamente requeriría condiciones para su observación incompatibles con el fenómeno de la vida [...] es evidente que las actitudes que llamamos mecanicistas y finalistas [es decir, intencionales] no representan puntos de vista contradictorios sobre los problemas biológicos, sino que más bien recalcan el carácter mutuamente excluyente de las condiciones observacionales que también serían indispensables en nuestra búsqueda de una descripción de la vida cada vez más profunda.⁵

⁵ N. Bohr, *Physical Science and the Problem of Life*, Wiley, Nueva York, 1958, p. 100.

Butler pensaba que la materia viviente puede “memorizar” su comportamiento no sólo en el nivel ontogénico de la experiencia individual, sino también en el nivel filogenético de la historia de la especie. La transición entre la ontogenia (el desarrollo de la vida individual) y la filogenia (la persistencia y cambio de muchos individuos a través del tiempo) es relativa. La diferencia entre un individuo recién nacido y el mismo individuo a la edad de 80 años es mayor, alegaba Butler, que la de un recién nacido de una generación y la de un recién nacido de la siguiente.

Los reptiles cambian su piel; los insectos modifican sus proteínas en la etapa de la pupa. Un cadáver se reemplaza, con cierta superposición, por el de su nieto. Nosotros los humanos modernos sabemos que una oruga se convierte por “metamorfosis” en una mariposa, pero empleamos el término “muerte” para describir lo que le ha sucedido al cuerpo de un abuelo. Sin embargo, tanto en el caso del insecto que experimenta la metamorfosis, como en el del abuelo que experimenta la muerte, reaparece el nuevo cuerpo de la juventud. Todos nosotros tenemos derecho a creer que morimos, dice Butler, pero esta demarcación es muy arbitraria. La muerte de un abuelo que haya contribuido a formar el cuerpo de su nieto es una prolongación, no un final abrupto, de la continuidad biológica. El “individuo” no se halla tan completo, a través del tiempo, como se nos ha enseñado.

Butler pensaba que la inconsciencia no sólo existe en los seres humanos adultos, sino que también en muchos niveles de la organización viviente. Las tareas más importantes, las que se repiten con más frecuencia, se han convertido en las más inconscientes, las más “fisiológicas”. El bombeo de la sangre es demasiado antiguo y demasiado importante como para ser modificado u olvidado fácilmente por un acto de la voluntad o por la simple pereza. Al divorciarse de la caprichosa conciencia, las actividades rutinarias pero críticas se realizan segura y adecuadamente. Las funciones fisiológicas importantes no se exponen a una experimentación que las pudiera destruir, cuando se realizan como trabajo regular y automático. El proceso de conducir un automóvil, al inicio consciente, se retrae en el inconsciente, permitiendo que la mente se ocupe de otras cuestiones.

Ningún concertista de piano se esfuerza en presionar las teclas ordenadamente. Los largos periodos de entrenamiento consciente han producido la integración del conocimiento musical en sus dedos. Los bailarines califican su talento de “memoria muscular”. La elección y la práctica se convierten en hábitos fluidos.

Las células, tras eones de práctica, no deciden conscientemente respirar oxígeno o reproducirse por mitosis. Ellas, o los restos bacterianos de que están compuestas, acaso alguna vez se esforzaron en hacerlo. Mientras más reciente sea un

hábito en el repertorio fisiológico de la vida, más probable es que sea consciente o por lo menos que se sujete a la intervención consciente. Hoy los animales, las plantas y los hongos ya no responden directamente a los procesos metabólicos con que las células obtienen energía al reaccionar el oxígeno con los átomos de hidrógeno de los alimentos para producir agua y bióxido de carbono. Este comportamiento metabólico se encuentra sumergido en el inconsciente permanente de los organismos modernos. Las reacciones oxígeno-hidrógeno que realizan las mitocondrias, alguna vez bacterias libres, representan una hazaña química que no ha cesado durante 2 000 millones de años, desde el tiempo en que los sistemas que respiraban oxígeno se adaptaron a un medio ambiente transformado por las cianobacterias oxigénicas. En cambio, la peristalsis de la digestión —también un fenómeno inconsciente pero que tienden a percibir los mamíferos— se desarrolló en los ancestros de los animales muchísimo después de la etapa microbiana. La deglución, las masticación y el habla son conductas que se aprendieron mucho más recientemente, y en ese orden.

La teoría butleriana de la memoria inconsciente sostiene que todos los seres son capaces de formar hábitos, algunos de los cuales, tras largo tiempo de repetición, se encarnan fisiológicamente en el curso de la evolución. Dice Butler que no podemos recordar cuándo desarrollamos un ojo en nuestro organismo. Algún día, sigue diciendo, tantos de nosotros habremos aprendido a leer y escribir, y lo habremos repetido tantas veces que habremos de nacer con ese conocimiento. Acaso un futuro William Harvey descubrirá los detalles de cómo el aprendizaje de la lectura se convirtió en un proceso fisiológico, así como el Harvey original descubrió la circulación de la sangre. En esto no estamos de acuerdo con Butler. No parece probable que los niños nazcan jamás con la capacidad de leer y escribir. Sin embargo, si se sustituye esta capacidad con la televisión, uno puede ver que Butler no estaba tan desencaminado: los niños nacen viendo la televisión, más o menos; y la televisión, ensamblada con productos tecnológicos producidos por compañías de todo el mundo, es ya tan compleja que pocos humanos entienden su funcionamiento detalladamente.

HÁBITOS Y MEMORIA

El libre albedrío y el estatus de los seres vivos como sistemas termodinámicos abiertos no nos deberían permitir utilizar de buenas a primeras la física clásica para justificar la idea de la vida como un fenómeno mecánico. Una propiedad

general que diferencia la vida de la materia no viviente es la coherencia histórica, la cual incluye el potencial para evolucionar. Mediante la exportación a su entorno del desorden, la aleatoriedad y la entropía, los sistemas vivientes incrementan la complejidad, inteligencia y belleza del medio ambiente, modificándolo con base en el pasado y planificando su futuro. Los organismos que encuentran nuevas formas de extraer energía y materia para perpetuarse tienden a preservarse, produciendo seres cada vez más curiosos y creativos. Las suposiciones y antojos se tienen que sustituir con firmes convicciones, pero los extraordinarios procesos de almacenamiento y transmisión de la vida que determinan la herencia molecular y la información cultural podrían ser lo suficientemente robustos como para abarcar el fenómeno que Butler proponía: la “memorización”, la transformación de los propósitos conscientes de una generación en las actividades y, a la larga, los procesos fisiológicos de la siguiente.

Aunque todavía no sabemos cómo los hábitos voluntarios de un organismo o incluso de una especie pueden convertirse en las funciones fisiológicas de una generación futura a través de la herencia material, es fascinante el planteamiento de Butler. Sabemos, por ejemplo, que muchos seres orgánicos adquieren nuevos rasgos heredables mediante la simbiogénesis y que muchos más, no sólo la gente, son capaces del aprendizaje. Los ecosistemas son cada vez más complejos y sensibles; los procesos que una generación realiza repetidamente en el medio ambiente podrían realizarse más fácilmente por la siguiente. Tenemos que abrir nuestra mente a esta posibilidad. Es posible cuestionar los conceptos de Butler, pero a él no se le puede acusar de poseer ese tipo de pensamiento atávico que insiste en proponer un estatus privilegiado para la humanidad. Puesto que disimuladamente nos consideramos seres divinos, amparándonos en la rúbrica científica de la “evolución cultural”, o en la noción, también desesperadamente eufemística, de que poseemos “cerebros grandes”, acaso hoy estamos más ecológicamente pobres de lo que estaríamos si hubiéramos adoptado hace un siglo la noción que Butler tenía de la vida como un continuo consciente.

Butler no se oponía a la evolución, sino a la pérdida de la riqueza de las anteriores y más vivaces ideas evolucionistas, las cuales planteaban que los seres vivos mismos se involucraban en la selección natural:

Según los señores Darwin y Wallace, tenemos derecho a la evolución, pero no lo tenemos en absoluto para verla como algo que se deriva principalmente del esfuerzo inteligente, guiado por [...] las sensaciones, las percepciones, las ideas. Tenemos que verla como un barajar de cartas [...] Según los hombres más viejos, las cartas cierta-

mente eran importantes, pero el juego lo era más. Ellos negaban la teleología temporal —es decir, la teleología que veía toda adaptación al entorno como parte de un plan ideado hacía muchas eras por un ser casi antropomórfico, maquinador [...] Este concepto lo consideraban repugnante tanto para la inteligencia como para la conciencia, pero, aunque no parecieron percibirlo, ellos dejaron la puerta abierta para un diseño más verdadero y más demostrable que aquel que habían rechazado [...] Hicieron posible que el desarrollo del hombre a partir de una ameba fuera parte íntegra de una historia que puede leerse, aunque en una escala infinitamente más pequeña, en el desarrollo de nuestras más poderosas máquinas de vapor a partir de una vulgar olla, o de nuestro más fino microscopio a partir de una gota de rocío. El desarrollo de la máquina de vapor y del microscopio se debe a la inteligencia y el diseño, los cuales en efecto aprovecharon las propuestas aleatorias, pero realizando mejoras sobre la base de éstas, dirigiendo cada paso de su acumulación, aunque jamás avanzando más de un paso o dos, y con frecuencia menos que esto.⁶

CELEBRACIÓN DE LA EXISTENCIA

A los hombres de ciencia ingleses del siglo XIX les resultaba natural y conveniente invocar la mecánica newtoniana y concebir la vida como si fuera la materia de Newton: ciegos átomos cuya reacción ante las fuerzas y leyes naturales era posible predecir. Como una maquinaria de relojería bien hecha, el mecanismo del mundo había sido manufacturado y donado por un dios trascendente —un dios que luego vería su creación desde el exterior—.

Fue ésta la nueva visión de la evolución: Dios, si existiera, era el Dios de Newton. Sin inmiscuirse en los asuntos humanos, Él era el dios de los matemáticos, el dios de la geometría, que habiendo hecho las leyes se apartaba para ver cómo sus leyes actuaban. Pero una visión más vieja admitía otra especie de dios —un dios más activo—. Fue ésta la visión que Samuel Butler intentó resucitar —la visión de que la vida misma era divina—. La vida no representaba un solo grandioso diseño, sino millones de pequeños propósitos, todos y cada uno vinculados con una célula o un organismo en su hábitat.

Para los neoneutonianos, es decir, los darwinianos, el libre albedrío había sido expulsado del universo porque éste se veía como un mecanismo y los mecanismos no poseen conciencia. Para Descartes, Dios tenía conciencia, y la gente

⁶ S. Butler, "The Deadlock in Darwinism", en R. A. Streatfeild (comp.), *The Humor of Homer and Other Essays*, Books for Libraries Press, Freeport, 1967, pp. 253-254.

también en la medida en que estuvieran en contacto con Dios. Pero cuando Darwin a través de sus minuciosas investigaciones demostró que también se podía explicar la existencia de los seres humanos mediante el mecanismo de la selección natural, la conciencia de repente se convirtió en algo redundante en el mundo humano. Butler resucitó el concepto de la conciencia afirmando que el conjunto de tantas acciones derivadas del libre albedrío, de tantos comportamientos que se convertían en hábitos, de tantas intervenciones de la materia en los procesos de la vida, de tantas decisiones respecto a dónde, cómo, con qué o con quién vivir, le habían dado forma a la vida, produciendo a través de los eones organismos visibles, incluidas las colonias de células que son los humanos. El poder y la percepción sensible se propagan como organismos. El dios de Butler es imperfecto, es un dios que se dispersa.

Para nosotros la visión de Butler —que descarta un arquitecto universal único— es atractiva. La vida es un producto demasiado imperfecto, tanto física como moralmente, como para que haya sido diseñada por un maestro impecable. Y sin embargo la vida es más sorprendente y menos predecible que cualquier “ente” cuya naturaleza se pueda explicar únicamente por la acción inflexible de “fuerzas” determinantes. Las cualidades divinas de la vida en la Tierra no incluyen ni la omnisciencia ni la omnipotencia, aunque se pueda hablar de la omnipresencia terráquea.

La vida, en la forma de innumerables células, desde la bacteria luminiscente hasta la rana que salta de lirio en lirio, se encuentra virtualmente por doquier en el tercer planeta. Toda la vida se conecta entre sí mediante el tiempo darwiniano y el espacio vernardskiano. La evolución nos coloca en el rudo pero fascinante contexto del cosmos. Aunque una cierta cosa extraña pueda esconderse detrás o más allá de este cosmos, es imposible probar su existencia. El cosmos, más maravilloso que cualquier dios de cualquier secta, es más que suficiente. La vida es la celebración de la existencia.

A nosotros nos intriga la olvidada teoría de Butler. La mente y el cuerpo no están separados del proceso unificado de la vida; son parte de él. La vida, sensitiva desde el inicio, tiene la capacidad de pensar. Los “pensamientos”, tanto los vagos como los claros, son físicos y existen en las células de nuestro cuerpo y del cuerpo de los demás animales.

Cuando uno lee estas palabras, los caracteres entintados activan las conexiones electroquímicas entre nuestras células cerebrales, despertando asociaciones mentales. La composición de la glucosa se altera por la reacción de sus elementos con el oxígeno, y los productos resultantes, agua y bióxido de carbono, se intro-

ducen en minúsculos vasos sanguíneos. Éstos bombean los iones de sodio y calcio que atraviesan la membrana de una neurona. Las células nerviosas refuerzan sus conexiones, nuevas proteínas de adhesión celular se forman y se produce una disipación térmica. El pensamiento, como la vida, es materia y energía en movimiento; el cuerpo es su “otro lado”. Pensar equivale a ser.

Si se acepta la existencia de esta continuidad fundamental entre el cuerpo y la mente, el pensamiento deja de ser esencialmente distinto a cualquier otro proceso fisiológico o conductual. Pensar, como excretar o deglutir, resulta de las activas interacciones químicas de un organismo. El pensamiento orgánico es una propiedad derivada del hambre celular, del movimiento, el crecimiento, la adaptación, de la muerte programada y de la satisfacción. Si lo que se conoce como el pensamiento es el resultado de interacciones celulares, entonces acaso los organismos que se comunican entre sí, todos ellos pensando, pueden crear un proceso que rebase el pensamiento individual. Esto podría ser lo que Vladimir Vernardski entendía por la noosfera.

Gerald Edelman y William Calvin, neurocientíficos ambos, han propuesto, cada quien por su lado, una especie de “darwinismo neural”. Nuestro cerebro, según ellos, se convierte en mente al desarrollarse mediante las reglas de la selección natural.⁷ Esta idea acaso pueda proporcionar un fundamento fisiológico para las intuiciones de Butler. En el cerebro en desarrollo de un feto mamífero, aproximadamente 10^{12} neuronas se conectan entre sí de 10^4 formas. Estas adhesiones de célula a célula en la superficie de las membranas de las células neurales se llaman densidades sinápticas. ¡Al madurar el cerebro, más de 90% de las células muere! Mediante la muerte programada y la síntesis proteínica predecible, las conexiones se atrofian o hipertrofian selectivamente. Las siempre dinámicas selecciones neurales que limitan las posibilidades, conducen a la elección y el aprendizaje, al tiempo que las interacciones celulares restantes se fortalecen. Las moléculas producidas por la adhesión de las células se sintetizan y algunas nuevas densidades sinápticas se forman y fortalecen cuando la práctica se convierte en hábito. La selección elimina la mayoría de las células neurales y sus conexiones, pero es indispensable para las pocas que quedan. Es evidente que se necesita trabajar más para entender las bases físicas del pensamiento y la imaginación, pero es posible que la muerte programada, dentro del vasto campo de las posibilidades bioquímicas proliferantes, se relacione con la mente tanto como ésta se relaciona con la evolución.

⁷ W. Calvin, *The Cerebral Symphony*, Bantam Books, Nueva York, 1989; véase también G. Edelman, *Neural Darwinism*, Basic Books, Nueva York, 1987.

Los embriones peculiarmente curvados de las aves, cocodrilos, cerdos y humanos son extraordinariamente similares. Todos se desarrollan a partir de un óvulo fertilizado y todos pasan por un estado en que muestran branquias, ya sea que respire el oxígeno del agua o el oxígeno del aire y que haya nacido de un huevo o de un útero. Las branquias que se cierran detrás de las orejas al desarrollarse el feto humano dan testimonio de que los humanos, así como los peces, cuyas branquias se desarrollan totalmente, tienen un ancestro común. Los embriones humanos tienen cola. La materia viviente “recuerda” y repite sus orígenes a fin de llegar al presente. En el mundo butleriano, la vida moldea la materia de los seres vivientes, una y otra vez, durante millones de generaciones. Creando una sensación de *déjà vu*, el embrión representa un proceso que alguna vez fue inconsciente y que nuevamente —en un nivel distinto— se vuelve consciente.

LA SUPERHUMANIDAD

Hoy está surgiendo un ser transhumano, una superhumanidad que se está convirtiendo en parte de la sinfonía de los sentidos. Se compone no sólo de gentes sino de sistemas de transportación de materiales, sistemas de transportación de energía, mercados globales, instrumentos científicos. La superhumanidad no sólo ingiere alimentos, sino también carbón, petróleo, hierro y silicio.

La red global que construye y mantiene las ciudades, las carreteras y los cables de fibra óptica crece sin cesar. En Nigeria, por ejemplo, se espera que la población llegue a 216 millones en el año 2010, lo cual doblaría la población de 1988. Tal crecimiento, si no se controlara, aumentaría la población a 10 000 millones en el año 2110 —dos veces más que la actual población humana global—. Nuestra enorme población terráquea actualmente aprovecha una proporción significativa de la energía solar que llega a la superficie de la Tierra. La energía de la fotosíntesis, del pasado y del presente, transformada en plantas comestibles, en pastos para los ganados, en reservas geológicas, y en músculos y cerebros humanos, sustenta la masiva construcción del ecosistema urbano transcontinental e incluso —“mordiéndole la mano de quien la alimenta”— la tala de los bosques que capturan y transforman la energía solar. Al expandirse el sistema mediante la utilización de tecnologías genéticas y atómicas, sus operaciones se vuelven más elegantes y coherentes. Pero también crece el potencial del desastre.

La superhumanidad no es un simple conjunto de seres humanos y tampoco algo distinto a la suma de éstos y sus instrumentos. Las tuberías, los túneles, los

conductos de agua, los alambres eléctricos, los ventiladores, los ductos de gas y de aire acondicionado, los elevadores, cables telefónicos, cables de fibra óptica, y otros vínculos, atrapan a los humanos en una red que crece veloz e incesantemente. La forma en que la superhumanidad se comporta es en parte resultado de decisiones económicas incontables e incontrolables que hace la gente —individual y colectivamente— en el contexto de un capitalismo cada vez más planetario. “El problema con el dinero —dice un personaje en un film reciente—, es que nos hace hacer cosas que no queremos hacer”.

Ya sea que las tendencias de la superhumanidad se deriven o no de una conciencia que se ubica más allá de nosotros, los individuos humanos no deberíamos sorprendernos si el conjunto de la humanidad planetaria muestra el surgimiento de comportamientos inesperados, aparentemente intencionales. Si las bacterias, que no tienen cerebro, pudieron amalgamarse como protistas fusionados que se clonaron a sí mismos y se transformaron a través del tiempo evolutivo en nuestra civilización, ¿qué habrá de surgir de los seres humanos amalgamados planetariamente? Negar la existencia de la superhumanidad diciendo que ésta es simplemente la suma de las acciones humanas, equivale a afirmar que una persona es meramente la suma de los microbios y células que constituyen su cuerpo.⁸

LA EXPANSIÓN DE LA VIDA

La vida hoy es un fenómeno autopoietico y fotosintético de escala planetaria. Siendo una transmutación química de la luz solar, intenta extenderse con exuberancia, rebasarse. Reproduciéndose, se mantiene a sí misma y a su pasado al crecer. Se transforma para adaptarse a las contingencias de su variable medio ambiente y al hacerlo lo modifica. Los procesos de la vida absorben gradualmente el hábitat, que deja de ser un telón de fondo estático e inanimado para convertirse cada vez más en algo como un hogar, un nido o una concha —es decir, en una parte integral, construida, del ser orgánico—. Los miembros de las 30 millones de especies que interactúan en la superficie de la Tierra siguen cambiando el mundo.

Cuando alcanzamos un nuevo entendimiento de la vida, vemos que las especies divergen, creando nuevas formas de vida, pero las formas anteriores jamás

⁸ Para más sobre el surgimiento de una superhumanidad, véase G. Stock, *Metaman: Humans, Machines, and the Birth of a Global Superorganism*, Bantam, Londres, 1993; para la relación entre las máquinas que cada vez más se parecen a formas de vida, y la creciente ingeniería de la vida, entre “lo nacido y lo construido”, como dice el autor, véase K. Kelly, *Out of Control: The Rise of Neo-biological Civilization*, Addison-Wesley, Reading, 1994.

desaparecen enteramente. Las más antiguas formas de vida, las bacterias que controlan la ecología planetaria, se suplementan, pero no se remplazan. Aunque toda la variedad de seres nucleados —todas las especies vegetales, animales, protistas y fúngicas— haya de perecer, nuevos taxones similares evolucionan a partir de las anteriores especies o de alguna de su tipo. Mientras tanto, las bacterias subyacentes siguen avanzando simbiogenéticamente.

Descubrimos que la naturaleza no siempre es “asesina” o, como dijo el poeta Alfred Tennyson, “de garra y colmillo rojos”. Los seres vivos son amoraes y oportunistas, cosa que se justifica por su necesidad de procurarse agua, carbono, hidrógeno y demás. Son estructuras materiales, energéticas e informativas con una larga historia y que se repiten fractalmente. Pero no son más inherentemente asesinas, competitivas, y carnívoras, que pacíficas, cooperativas y lánguidas. Lord Tennyson también podría haber descrito la naturaleza como “verde de tallo y hoja”.

Algunos de los más exitosos —es decir, abundantes— seres vivos en nuestro planeta son aquellos que se han conjuntado. Al introducirse (o acaso ser introducidas a la fuerza) en otras células las cianobacterias que se convirtieron en cloroplastos dentro de las células protistas o vegetales no desaparecieron; se transformaron. Lo mismo sucedió con las mitocondrias —alguna vez bacterias aerobias— que le dan a los músculos de nuestros dedos la energía para pasar las páginas de este libro. Las primitivas bacterias, como sí mismas o como partes de células más grandes, siguen siendo las formas de vida más abundantes en el planeta Tierra.

La potencia de la simbiosis como fuerza evolutiva socava la extendida noción de la individualidad como algo fijo, algo asegurado y sagrado. Un ser humano en particular no es un ser único, sino un ser compuesto. Todos nosotros les proporcionamos un estupendo medio ambiente a las bacterias, hongos, nemátodos, ácaros y otros microorganismos que viven en nosotros y en torno a nosotros. Nuestro intestino está lleno de microorganismos entéricos y levaduras que fabrican nuestras vitaminas y ayudan a metabolizar nuestra comida. Los voraces microbios de nuestras encías se parecen a los clientes que se aglomeran en los grandes almacenes que ofrecen rebajas los días festivos. Nuestras células, llenas de mitocondrias, evolucionaron a partir del acoplamiento de las bacterias aerobias y las bacterias fermentadoras. Acaso se puedan detectar espiroquetas simbióticamente desvanecidas en los undilopodios de las trompas de Falopio o en los flagelos de los espermatozoides. Acaso sus restos siguen moviéndose sutilmente en los innumerables microtúbulos de nuestro cerebro, que no cesa de crecer. “Nuestro” cuerpo es en realidad la propiedad conjunta de los descendientes de diversos ancestros.

La individualidad no se encuentra atrapada en ningún nivel, ya sea el de nuestra propia especie o el de la *Amoeba proteus* de los estanques. La mayor parte de nuestro peso neto se compone de bacterias, pero los humanos, como ciudadanos que se aglomeran en las calles o las oficinas, que ven la televisión, que viajan en vehículos y que se comunican con teléfonos celulares, desaparecen en el torbellino de las actividades, en la inundación creada por estructuras y habilidades que surgen por doquier y que jamás podrían realizar como individuos. Ningún ser humano podría comunicarse individualmente en tiempo real con otro que se encontrara a miles de kilómetros de distancia. Ningún ser humano podría haber llegado individualmente a la Luna. Éstas son habilidades emergentes de la superhumanidad. Nuestras actividades globales recuerdan a las de los insectos sociales, salvo que nuestro “enjambre” es casi toda la biosfera existente.

Inextricablemente implantada en la biosfera, esta sociedad superhumana no es independiente. La vida que se extiende en la Tierra —la flora, la fauna, la microbiota— representa un solo sistema planetario conectado por océanos y envuelto por gases, y es el ser orgánico más grande en el Sistema Solar. El manto superior, la costra, la hidrosfera y la atmósfera de la Tierra se encuentran en un estado organizado que es muy distinto al de la superficie de nuestros planetas vecinos. La fotosíntesis, la respiración, la fermentación, la biomineralización, la expansión de las poblaciones, la germinación de las semillas, las estampidas, las migraciones de las aves, las actividades de la minería, el transporte y la industria activan y modifican la materia en escala global. La vida tiene un dramático impacto en el medio ambiente mediante la producción y el almacenamiento de esqueletos y conchas de fosfato de calcio y de carbonato de calcio, y mediante el almacenamiento, como carbón, de los restos de las plantas y, como petróleo, de los restos de las algas. Extensas capas de minerales —sulfitos de hierro, plomo, zinc, plata y oro— permanecen en los lugares donde se precipitaron por la acción de las bacterias productoras de gas hidrógeno.

Algunos minerales que no se asocian usualmente con la vida —el aragonito, la barita, la calcita, la francolita, la fluorita— existen como cristales y esqueletos dentro de los organismos vivos, y afuera de ellos como exoesqueletos o conchas. Las plantas y los microbios inducen la formación de sustancias “inanimadas” como la barita, los óxidos de hierro, la galena (sulfuro de plomo) y la pirita (sulfuro de hierro u oro de los tontos). Se denomina la edad de piedra, la edad de hierro, la edad de bronce a las grandes culturas de la humanidad. Hay quienes alegan que con la llegada de las computadoras en la Tierra se ha iniciado la “edad del silicio”. Pero la metalurgia natural que produjo mediante bacterias la magneti-

ta de las brújulas internas de ciertos organismos se inició 3 000 millones años antes que la metalurgia humana. Se piensa que *Pedomicrobium*, una bacteria del suelo cuyo fósil se ha descubierto en muestras de oro, precipita iones de oro y de esta manera acumula partículas de oro en su cápsula. Comparada con los cientos de kilómetros cúbicos de arrecifes tropicales construidos por los corales y las extensas calizas precipitadas por los foraminíferos y los cocolitofóridos, la tecnología humana no parece ser tan exclusivamente majestuosa.

Nuestro destino está vinculado con el de las demás especies. Cuando nuestra vida se relaciona con la vida de los diferentes reinos —las plantas que florecen y fructifican, los hongos recicladores y a veces alucinógenos, los animales salvajes, los animales mascotas, los microbios saludables y los microbios que alteran el tiempo— entonces sentimos lo que significa estar vivos. La supervivencia al parecer siempre requiere más interrelaciones, más interacciones con los miembros de otras especies, integrándose cada vez más con la fisiología global. A pesar del tono apocalíptico de algunos defensores del medio ambiente, nuestra especie está en camino de integrarse mejor con el funcionamiento global. Aunque la tecnología puede envenenar a los humanos y a otros organismos, anulando su desarrollo, también tiene la capacidad de abrir paso al advenimiento del próximo gran cambio en la organización de la biosfera.

El trabajo en equipo le permitió a la vida extenderse en la Tierra: los microbios anaeróbicos se unieron para crear los ancestros nadadores de las colonias protistas; los mastigotas ingirieron pero no digirieron las mitocondrias que les permitieron invadir los nichos ricos en oxígeno de la superficie de la Tierra; los hongos y las algas se combinaron simbióticamente para formar líquenes que colonizaron las rocas desnudas de la tierra seca. La transportación de la vida hasta nuevos cuerpos planetarios también requerirá el trabajo en equipo. La astronáutica, los computadores, la genética, la ciencia biosférica, las telecomunicaciones y demás formas de la moderna tecnología humana tendrán que combinarse con la tecnología precedente —sobre todo la fotosíntesis— de otros compañeros planetarios. La explosión que finalmente impulsará la vida hasta su próxima frontera —la del espacio sideral— tendrá que basarse en la nueva tecnología de la vida misma. La vivificación y la terraformación —el nacimiento de otros cuerpos planetarios— no sólo son procesos humanos. Algún día los ecosistemas de reciclaje dentro de las naves espaciales podrán alimentar a los humanos que viajen a otros planetas. Para que los humanos residan en el espacio sideral o viajen más allá de la órbita de la Tierra, sin duda tendrán que viajar junto con ellos las plantas que les proporcionen alimentos, las bacterias que digieran lo que comen, los hongos

y otros microbios que reciclen sus desechos y la tecnología que los sustente. La proyección en el espacio de nuestro desequilibrio termodinámico terráqueo involucrará representantes de los cinco reinos que han forjado nuevos ecosistemas y son capaces de transferir la energía y reciclar la materia aislados del planeta madre, recreando la biosfera original de la Tierra.

La distinción entre la colonización del espacio mediante máquinas solamente y mediante la vida y las máquinas conjuntamente, refleja un debate que Samuel Butler tuvo consigo mismo en un periódico de Nueva Zelanda. En 1862 Butler envió un artículo anónimo a *The Press* de Christchurch, Nueva Zelanda. A la sazón él criaba borregos en el distrito de Upper Rangitata de la provincia de Canterbury. Con el título de “Darwin y el origen de las especies, un dialogo”, el artículo anónimo generó vivas críticas. Butler contribuyó al debate con críticas contra sí mismo y contra otros, firmando sus opiniones opuestas con nombres diferentes. Sus argumentos apoyaban dos interpretaciones de las máquinas radicalmente opuestas.

En “Darwin entre las máquinas”, una carta firmada por un tal Cellarius que apareció en *The Press* el 13 de junio de 1863, Butler sostenía que las máquinas eran la forma de vida más nueva en la Tierra, y que estaban listas para derrocar y esclavizar a sus constructores y amos humanos; la velocidad de la evolución y la reproducción de las máquinas era prodigiosa, y si no se llevara a cabo de inmediato contra éstas una “guerra hasta la muerte”, sería ya demasiado tarde para impedir que dominaran el mundo. Luego, en un artículo titulado “Lucubratio Ebria” que apareció el 29 de julio de 1865, Butler le respondió a Cellarius diciéndole que los seres humanos ni siquiera podrían ser humanos sin utilizar ropa, herramientas y otros accesorios mecánicos, y que las máquinas no representaban una amenaza para la vida humana sino que eran una extensión natural de la vida, vinculada inseparablemente con ella.⁹

Si los vehículos espaciales efectivamente se liberan de la influencia humana, viajando a través de los cielos estrellados por sí mismos y reproduciéndose a sí mismos, entonces vindicarán a Cellarius y otros luditas. Pero si las máquinas en el espacio no sólo florecen por sí mismas sino como hábitats para una amplia diversidad de otras formas de vida, entonces el autor de “Lucubratio Ebria” habrá tenido la razón.

Nosotros apostamos por el último. Creemos que las máquinas florecerán mediante una interfaz muy estrechamente ligada a la vida —no sólo la vida humana,

⁹ S. Butler, “Darwin among the Machines y Lucubratio Ebria”, en H. F. Jones (comp.), *The Note-Books of Samuel Butler, Author of 'Erewhon'*, Dutton, Nueva York, 1863/1917, pp. 46-53.

sino una rica diversidad de formas de vida nutridas con la luz de las estrellas—. La participación de la gente es esencial a fin de que sea posible la exportación de la vida hacia la fantástica noche sideral. Pero al igual que la cola del espermatozoide que se desprende una vez que el mensaje genético se introduce en el óvulo, los seres humanos son al fin y al cabo prescindibles. Incluso sin nuestra ayuda, 100 millones de años más de exuberancia planetaria impulsada por el Sol serán suficientes para que la vida de la Tierra se proyecte hacia las estrellas. Podrían evolucionar otras especies tecnológicas. Además, no sólo los humanos han emprendido la exploración espacial.

Al pisar la Luna, Neil Armstrong dijo: “Un pequeño paso para el hombre, un salto gigantesco para la humanidad”. En cierto sentido esto era verdad; pero no pensó en la gran cantidad de bacterias que en su piel y en sus intestinos dieron el paso junto con él. Desde sus inicios la vida ha sido un fenómeno expansionista. Una vez que se asentara firmemente en el espacio sideral, podría despojarse de sus zapatos humanos y multiplicarse salvajemente.

RITMOS Y CICLOS

Nosotros y muchos otros animales dormimos y despertamos en ciclos que se repiten cada 24 horas. Ciertos protistas oceánicos, los dinomastigotas, se iluminan cuando cae la tarde, apagándose dos horas después. Tan vinculados están con el ritmo cósmico de la Tierra que incluso estando lejos del mar, en los tanques de los laboratorios, ellos saben cuándo se pone el Sol. Son abundantes los ejemplos de este tipo porque la materia viviente no es una isla, sino parte de la materia cósmica que la rodea, y la vida baila al ritmo del universo.

La vida es un fenómeno natural tan finamente armonizado con su hábitat cósmico que incluso una variación relativamente mínima del ángulo y de la temperatura de la Tierra mientras ésta gira en torno al Sol es suficiente para despertar o silenciar el canto de las aves, los sapos, los grillos y las cigarras. Pero el firme pulso de la Tierra que gira y orbita en su medio ambiente cósmico representa más que un metrónomo para las vidas diarias y estacionales. También es posible oír otros ritmos, más amplios y profundos, más difíciles de discernir.

Muchas formas de vida construyen estructuras que las encapsulan y protegen de los peligros temporales del entorno. Los propágulos de muchos tipos de formas de vida son como representantes miniaturizados y viables de los seres orgánicos adultos. Abarcan desde las esporas bacterianas y micóticas hasta los cistos

protistas; desde las esporas, el polen, las semillas y las frutas de las plantas, hasta los huevos secos de algunos crustáceos, insectos y reptiles. Al proliferar los propágulos, la selección natural los trata severamente: muchos mueren o dejan de crecer.

Resistentes a la disecación y a la radiación, la mayoría de los propágulos metabolizan muy lentamente. Las esporas de las bacterias a veces permanecen en estado latente durante 100 años —hasta que no caiga la lluvia o no abunde el fósforo o no mejoren las condiciones de aridez—. Sin poseer semillas latentes o esporas resistentes, los humanos sobreviven en medio de extraordinarios peligros climáticos. Las casas, las vestimentas, los ferrocarriles y los automóviles han posibilitado nuestra expansión desde los hábitats subtropicales hasta las zonas más frías. Análogas a las esporas, los cistos y las semillas, estas estructuras nos protegen de las inclemencias.

Los invernaderos recicladores son hábitats aislados que contienen ejemplares representativos de la vida terráquea. En ellos se elimina la toxicidad de los venenos y se transforman los desechos en comida. Un invernadero que ha diseñado Santiago Calatrava se instalará en el techo de la catedral de Saint John the Divine de Nueva York, abarcándolo todo. Estas especies de “biosferas artificiales” miniaturizan los procesos cruciales de la autopoiesis del ecosistema global.

El ecosistema global no es un ser orgánico común y corriente. El sistema global, al igual que todos los seres vivos, es un sistema abierto energéticamente: la radiación solar llega regular y continuamente; la radiación térmica se disipa regular y continuamente. Pero a diferencia de los demás sistemas vivos, el sistema global se cierra a los intercambios materiales. Nada entra en él, salvo los ocasionales meteoritos o cometas. Nada lo deja, salvo los gases producidos por los ocasionales movimientos geológicos que modifican levemente la costra de la tierra. Toda la materia que utiliza la vida es materia reciclada, una materia que reaparece y jamás se consume totalmente.

Ninguna célula u organismo vivo se alimenta de sus propios desechos. Por lo tanto, los ecosistemas artificiales tienen una importancia biológica que supera a la arquitectura o a otras estructuras humanas. Por primera vez en la historia de la evolución, la biosfera se ha reproducido o, mejor dicho, se ha empezado a reproducir a sí misma a través de la humanidad y la tecnología. La generación de nuevos “capullos”, sistemas vivos materialmente cerrados, dentro de la “biosfera madre”, es similar a la estructura de un fractal.

Desde una perspectiva “verde” o “ecológicamente profunda” los humanos no dominamos la naturaleza, sino que estamos profundamente incrustados en ella.

Las biosferas artificiales son los primeros capullos de un ser orgánico planetario, ya que las biosferas “hechas por el hombre” tienen el potencial de duplicar la autosuficiencia biosférica que depende de la luz. Algunos investigadores de la NASA, de las agencias espaciales europeas, de los gobiernos, de la industria privada, del mundo académico o de otras instituciones estudian estas estructuras resistentes a la aridez que encierran, como nuevas arcas de Noé, especímenes de la vida —no en museos, sino en formas vivientes autosustentables—. La más grande de estas estructuras recicladoras de la vida es Biosphere 2, la cual se encuentra en el desierto de Sonora, cerca de Oracle, California. En realidad, los ecosistemas cerrados no son artificiales en absoluto, sino que forman parte de los procesos naturales de automantenimiento, reproducción y evolución en un universo disipador de energía térmica.

Para que un ser orgánico pueda sobrevivir en el espacio, su comida debe renovarse y los sistemas de reciclaje de los desechos deben funcionar a la perfección. La fotosíntesis ha podido almacenar energía solar en las rocas, en la forma de reservas de keroseno, petróleo, gas, sulfuro de hierro, carbón y otras sustancias. La especie más pródiga del planeta hoy consume estas reservas, utilizando su energía para multiplicar su población. *Homo sapiens* consume las riquezas producidas por los eones; mientras tanto, se aceleran a través de los siglos los ritmos terráqueos de la construcción y destrucción tecnológica. Se ha acrecentado la destrucción creativa que realiza la humanidad. Pero la naturaleza no ha llegado a su fin, y tampoco se requiere salvar al planeta. La disonancia tecnológica no marca el fin, sino una pausa, un restablecimiento de las fuerzas.

La vida global es un sistema más rico que cualquiera de sus componentes. Nosotros somos los únicos animales que construimos telescopios y extraemos diamantes arqueanos de las minas. Pero, aunque no es previsible ni fácil que nadie nos remplace, nosotros no gobernamos la vida. Los diamantes están hechos de carbón, un elemento básico de la vida desde su surgimiento hace unos 4 000 millones de años; y los telescopios son lentes, y como tales partes del ojo complejo de un ser metahumano que por sí mismo es un órgano de la biosfera.

La continua metamorfosis del planeta es el resultado acumulado de los muy diversos seres que lo habitan. La humanidad no es la conductora de la sinfonía de los sentidos: con o sin nosotros, la vida continuará. Detrás del tumulto desconcertante del presente podemos oír una nueva pastoral, como si fuéramos trovadores medievales que ascendieran una montaña. Esta melodía promete una nueva naturaleza, conjugación de la tecnología y la vida que disemina los propágulos de las especies terráqueas en otros planetas y en las estrellas aún más lejanas.

Desde una perspectiva verde, tiene mucho sentido interesarse vivamente en la alta tecnología y en la alteración del medio ambiente. Ha sonado la hora para la humanidad. La Tierra está empezando a propagar sus semillas.

BIBLIOGRAFÍA

- Bohr, N., *Physical Science and the Problem of Life*, Wiley, Nueva York, 1958.
- Butler, S., "Darwin among the Machines y Lucubratio Ebria", en H. F. Jones (comp.), *The Note-Books of Samuel Butler, Author of 'Erewhon'*, Dutton, Nueva York, 1863/1917, pp. 46-53.
- , "The Deadlock in Darwinism", en R. A. Streatfeild (comp.), *The Humor of Homer and Other Essays*, Books for Libraries Press, Freeport, 1967, pp. 253-254.
- Calvin, W., *The Cerebral Symphony*, Bantam Books, Nueva York, 1989.
- Culver, S. J., "Foraminifera", en J. H. Lipps (comp.), *Fossil Prokaryotes and Protists*, Blackwell Scientific Publications, Boston, 1993, p. 224.
- Darwin, E., *Zoonomia; or, the Laws of Organic Life*, Johnston, Londres, 1794.
- Edelman, G., *Neural Darwinism*, Basic Books, Nueva York, 1987.
- Folsome, C., "Microbes", en T. P. Snyder (comp.), *The Biosphere Catalogue*, Synergetic Press, Oracle, 1985, pp. 51-56.
- Jones, H. F., "The Butler-Darwin Quarrel", en H. F. Jones (comp.), *Samuel Butler, Autor of 'Erewhon' (1835-1902): A Memoir*, vol. II, Macmillan, Londres, 1919, pp. 446-447.
- Jones, H. F., y A. T. Bartholomew (comps.), *The Shrewsbury Edition of the Works of Samuel Butler*, Dutton, Nueva York, 1924.
- Kelly, K., *Out of Control: The Rise of Neo-biological Civilization*, Addison-Wesley, Reading, 1994.
- Koshland, D. E., "A Response-Regulated Model in a Simple Sensory System", *Science*, 196: 1055-1063, 1992.
- Pascal, B., *Pensées*, Peguin, Nueva York, 1995. [Versión en español: *Pensamientos*, trad. de Javier Zubiri, Alianza, Madrid, 2004.]
- Stock, G., *Metaman: Humans, Machines, and the Birth of a Global Superorganism*, Bantam, Londres, 1993.
- Tarán, L., *Parmenides: A Text with Translation, Commentary, and Critical Essays*, Princeton University Press, Princeton, 1965.

Kim Sterelny y Paul Griffiths

XXVIII. ¿QUÉ ES LA VIDA?*

DEFINICIÓN DE LA VIDA

Las definiciones explican el significado de un término relacionando el término definido con otras expresiones del lenguaje. Por ejemplo, una definición de *ácido* especifica las condiciones tanto necesarias como suficientes que todos —y solamente— los ácidos tienen. De manera más general, las definiciones relacionan ciertas cosas de un lenguaje con otras cosas del mismo lenguaje. El significado de algunos de estos términos a su vez puede explicarse mediante las definiciones respectivas. Pero la cadena de definiciones tiene que llegar a su fin en algún momento. Es necesario entender algunos conceptos sin la ayuda de otras fórmulas verbales. Así, en la semántica y en la psicología hoy se dice que nuestra capacidad para utilizar conceptos y referirnos a los tipos [de cosas] no tiene que depender de la captación —implícita o explícita— de las condiciones necesarias y suficientes para que pertenezcan a esas categorías. Los humanos hemos sido capaces de utilizar los términos para las categorías químicas y físicas (*hierro, líquido, sal, planeta*), mucho antes de que comprendiéramos su naturaleza. Aunque las categorías naturales pueden poseer una esencia, ésta no se descubre mediante la construcción de una definición en el inicio de la indagación, sino —con suerte— al final de la misma.

En consecuencia, los biólogos no necesitan una definición de la *vida* para entenderla. Pero las definiciones con frecuencia resultan útiles. Cuando las categorías se superponen parcialmente o cuando se confunden, la precisión que puede ofrecer una definición es importante, pues las definiciones nos permiten advertir diferencias importantes que fácilmente se podrían pasar por alto. Limitados como estamos a permanecer en la superficie de un globo casi esférico, es muy natural que no podamos percibir la diferencia entre la masa y el peso que resulta de la

* Este capítulo apareció originalmente como la sección 15.1 del libro de K. Sterelny y P. Griffiths, *Sex and Death: An Introduction to Philosophy of Biology*, The Chicago University Press, Chicago, 1999, pp. 357-364. © The University of Chicago Press.

interacción de la masa y el campo gravitacional. Por lo tanto, las definiciones que explicitaron esta distinción fueron importantes para el desarrollo de la física. Como vimos en la segunda parte, el término *gen* se ha utilizado para denominar tipos de cosas muy diferentes en la biología; explicitar estas distinciones elimina la confusión. Similarmente, pueden ser importantes los diferentes conceptos que se tengan sobre el organismo, y es por lo tanto importante que las diferencias sean señaladas explícitamente. Así, la definición puede ser una herramienta útil para el progreso teórico.

Sin embargo, no creemos que el avance de la biología se vea hoy obstaculizado por el hecho de que los biólogos utilicen el término *vida* para diversas, aunque relacionadas, categorías. Por ejemplo, no vemos qué utilidad tendría una definición de *vida* para clarificar ciertos casos extraños y difíciles de clasificar: los priones, los virus, las colonias de insectos sociales, o la idea aún menos verosímil de que la Tierra misma es un sistema viviente. Reflexionemos un instante en la *hipótesis de Gaia*, la idea (según una de sus versiones) de que la Tierra misma, o acaso sólo la biosfera, es un organismo viviente. Para nosotros, una definición de la vida poco serviría en la evaluación de esta metáfora. En algunos muy importantes aspectos, la Tierra obviamente no es similar a un organismo. No es el resultado de la evolución mediante la competencia dentro de una población ancestral de protoGaías. La biosfera tampoco se ha producido por un ciclo de desarrollo. Nuestra actual biosfera no habrá de producir una semilla planetaria que al crecer se convierta en la biosfera de la Tierra posteriormente.

Si nos atenemos a la historia típica de los entes vivientes, hemos de concluir que Gaia no es un ente viviente. Pero ¿qué importa? Los partidarios de la idea de Gaia se atienen a las interconexiones y las recíprocas influencias causales que mantienen los entes unos con otros y con el medio ambiente abiótico. Estas interacciones recíprocas, dicen ellos, actúan como mecanismos estabilizadores u homeostáticos. Es problemática, tanto conceptual como empíricamente, la evaluación de este planteamiento. Como señala Kirchner,¹ en algunos aspectos la vida evidentemente no ha sido homeostática. La vida, después de todo, alteró radicalmente la composición de la atmósfera terrestre. Así que sin una especificación exacta de los mecanismos homeostáticos correspondientes, siendo tan vaga la idea de que la biosfera es una serie de mecanismos homeostáticos de autorregulación interconectados, es imposible esta evaluación. Pero incluso si esta cuestión fuera más precisa, sería irrelevante que la biosfera estuviera o no viva. No tene-

¹ J. W. Kirchner, "The Gaia Hypotheses: Are They Testable? Are They Useful?", en S. Schneider y P. J. Boston (comps.), *Scientists on Gaia*, MIT Press, Cambridge, 1991, p. 41.

mos que hacer un rodeo a través de la cuestión para evaluar las diversas hipótesis de Gaia y determinar hasta qué punto los sistemas vivientes y su medio ambiente se modifican entre sí, hasta qué punto y en qué forma tales interacciones se estabilizan, o hasta qué punto estas modificaciones mutuas hacen que la Tierra sea más acogedora para la vida.

Así que la definición de la vida no es un prerequisite para determinar el alcance de la biología. El renovado interés en las definiciones de la vida proviene de otra fuente: el interés en la *biología universal*. Todos los sistemas vivientes de la Tierra tienen en común muchas propiedades importantes. Los sistemas son células o se componen de células. Las proteínas tienen un papel esencial en el metabolismo de todos los entes vivientes, y los ácidos también desempeñan una función esencial en el proceso mediante el cual la vida da origen a la vida. La replicación y la reproducción dan como resultado poblaciones que compiten consigo mismas, y la selección natural de las variantes dentro de estas poblaciones produce la adaptación, a veces una compleja adaptación. Todos los organismos viven dentro de un régimen donde opera principalmente la selección natural. ¿Pero son característicos tan sólo de la vida como la conocemos aquí y ahora, estos y otros aspectos universales de la vida? ¿O serán algunos de estos aspectos verdaderamente universales, es decir, aspectos de la vida en cualquier lugar y en cualquier época? Aquellos que se interesan en la biología universal no sólo buscan caracterizar la vida *como es*, sino *como debe ser*. Para ellos, una definición de la vida equivale a una especificación de la esencia real de la vida.²

Vale la pena hacer una pausa aquí para que veamos hasta qué punto es ambicioso este proyecto. A los biólogos desde siempre les han interesado los principios generales. Hemos examinado anteriormente muchos que podrían derivarse de la ecología y de la biología evolutiva. Ha sido bastante difícil encontrar principios que sean verdaderos para toda la vida actual. Hemos alegado que las hipótesis de la adaptación y la ecología se pueden entender mejor como hipótesis sobre grupos biológicos específicos, como ramas específicas del árbol de la vida, que como hipótesis sobre la vida en su totalidad. Si esto es cierto, ¿entonces qué se corresponde en verdad con la biología universal: las generalizaciones que sólo se pueden aplicar a nuestro mundo viviente o las que se pueden aplicar a cualquier mundo viviente?

² M. A. Bedau, "The Nature of Life", en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Oxford, 1996, pp. 322-360; C. G. Langton, "Artificial Life", en M. A. Boden (comp.), *op. cit.*, pp. 39-94; T. S. Ray, "An Approach to the Synthesis of Life", en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Oxford, 1996, pp. 111-145.

A pesar de la dificultad del ambicioso proyecto, algunos biólogos han explorado la distinción entre los aspectos específicos de la vida en la Tierra y los aspectos que la vida necesariamente posee. Gould, Kauffman, Goodwin y Dawkins tienen cada uno ideas muy diferentes sobre la evolución, pero a todos les interesa esta cuestión. En otra obra,³ nosotros examinamos la idea de Gould de que es fortuita la serie de complejas adaptaciones que la evolución ha generado en la Tierra, así como su idea de que es una cuestión estadística, más que una necesidad evolutiva, el hecho de que la complejidad de la vida haya tendido a ascender evolutivamente a lo largo del tiempo. Gould enfatiza principalmente la contingencia en la historia de la vida. Por su parte, Dawkins⁴ cuestiona la idea de que los mecanismos medulares de la vida se han derivado de un “accidente histórico”. Según él, los aspectos medulares, tanto de la biología del desarrollo como de la genética, son aspectos de la biología universal. Dawkins niega la posibilidad de una *evolución lamarckiana*, por lo menos si ésta se entiende como la herencia a la siguiente generación de tan sólo los cambios *adaptativos*. El fenotipo de un organismo ciertamente puede cambiar el genotipo de su línea germinal. Por ejemplo, un organismo puede quedar expuesto a los agentes mutagénicos del medio ambiente, o actuar de una manera que disminuya la eficiencia de los mecanismos de corrección de pruebas de su ADN. Pero todo esto no resulta lamarckiano todavía, ya que tales cambios en la corriente de la influencia que desde el progenitor llega hasta su cría no hacen que sea mayor la probabilidad de que ésta sea similar al progenitor en este aspecto. No es probable que una rata que prefiera hacer su nido en los reactores nucleares produzca crías cuyo ADN se haya alterado de tal forma que las induzca a preferir lo mismo. Dawkins acepta que es posible, aunque difícil, imaginar mecanismos en que la adquisición de un nuevo rasgo fenotípico altere los replicadores responsables del fenotipo de la sucesiva generación en una forma que produzca la reaparición del nuevo fenómeno. Según él, es mucho más difícil imaginar mecanismos que sean sensibles a la distinción entre los nuevos cambios adaptativos y los que no lo son, y que determinen que sólo los cambios adaptativos tengan mayor posibilidad de reaparecer en la siguiente generación.⁵

Nosotros vemos con escepticismo las ideas de Gould en torno a la contingencia. Tampoco confiamos en los argumentos sobre la plausibilidad de las afirmaciones sobre la imposibilidad —“los argumentos basados en la incredulidad personal”, como el mismo Dawkins los ha calificado en un contexto diferente—. Al

³ K. Sterelny y P. Griffiths, *op. cit.*, capítulo 12.

⁴ R. Dawkins, *The Blind Watchmaker*, W. W. Norton, Nueva York, 1986.

⁵ *Ibid.*

fin y al cabo, Dawkins piensa que los memes son replicadores. Los memes —si por éstos se entiende el contenido informativo de las ideas— efectivamente cambian, a veces adaptativamente, cuando participan en una interacción específica. Si alguien que use una herramienta de piedra descubre que pulir su filo con otra piedra lo afila, tal cosa representa un cambio en un meme específico. Es una mutación que probablemente se transmita sucesivamente porque resulta adaptativa. De manera que si la interacción entre el fenotipo y el medio ambiente puede mejorar un meme que se transmite, no vemos por qué Dawkins piensa que no podría operar un mecanismo similar en otros replicadores. Si los memes son realmente replicadores, entonces son replicadores de un modelo reciente con profundas raíces en la historia primitiva de un mundo viviente. Así que es posible que los mecanismos que permiten que su evolución sea en este sentido lamarckiana dependan de una rica historia de cambio evolutivo anterior. Pero nosotros no vemos por qué esto tendría que ser así. Después de todo, la fidelidad de la replicación genética, así como la apropiación de los genes de la línea germinal que se da en muchas especies, son en sí productos de una larga evolución.

A pesar de nuestro escepticismo respecto a estos planteamientos específicos, estamos de acuerdo en que tras la idea de la biología universal se esconde una muy buena pregunta. Nosotros no sólo buscamos una explicación de la biología real en toda su diversidad, sino también el esclarecimiento de por qué tal diversidad no es todavía mayor. Sin embargo, podemos ver dos problemas en nuestro interés por una elucidación de los límites de la diversidad de la vida.

Primero, no podemos conceptualizar esta cuestión mediante la diferenciación de la aleatoriedad y la necesidad. Consideremos, por ejemplo, la indagación de David Raup sobre las formas posibles y reales de las conchas. Él demuestra, en una primera aproximación, que la forma de una concha se puede explicar como el resultado de tres distintos parámetros de crecimiento. Con base en este dato, se podría decir que las conchas reales ocupan una región bastante pequeña del espacio de las conchas posibles.⁶ ¿Por qué? ¿Es esta limitación una consecuencia de la función de ciertas sutiles restricciones en el desarrollo, o de la contingencia histórica? Éstas son preguntas obviamente difíciles, pero interesantes. Sin embargo, se puede decir que es muy improbable que sea literalmente imposible la ocupación de la mayor parte de la región no ocupada. Es igualmente improbable que la región ocupada lo haya sido únicamente por causa de la aleatoriedad histórica. Similarmente, no existen las especies con tres sexos, y el hecho no es accidental.

⁶ Para una elegante discusión de este tema, véase R. Dawkins, *Climbing Mount Improbable*, W. W. Norton, Nueva York, 1996, capítulo 6.

Como precisa la literatura sobre la evolución del sexo, el sexo tiene un costo, y éste se incrementaría en la medida que aumentara el número de los sexos. ¿Pero debemos inferir de lo anterior que es imposible la evolución de tres sexos? Sería imprudente. Podemos concebir la posibilidad de una biología del desarrollo que pudiera funcionar con tres sexos. El ADN nuclear tiene dos progenitores; podrían ser tres si el ADN mitocondrial proviniera de un tercero. Pero una trayectoria evolutiva que condujera a la existencia de tres sexos sólo en muy excepcionales circunstancias sería elegida por la selección, y además estaría disponible para un linaje. Así que, como Dennett⁷ ha observado, comparar el accidente histórico con la necesidad es probablemente una manera errónea de plantear este problema. Tal distinción es demasiado burda como para abarcar las cuestiones que realmente nos interesan. En cambio, necesitamos tener un concepto sobre la *improbabilidad* de un fenómeno. Los murciélagos evolucionaron [para volar] (originalmente la revisora agregaba “el vuelo” para aclarar el tipo de evolución, pero creo que se entiende mejor de la otra forma); ningún miembro de los marsupiales lo hizo. ¿Por qué sería un marsupial volador menos probable que un placentario volador? Aunque ésta es una pregunta difícil de contestar, sin duda es mejor que preguntar si un marsupial volador es imposible o no.

Otro problema consiste en la dificultad de poner a prueba las conjeturas sobre la biología universal. Este problema de la comprobación es uno de los combustibles del tan cacareado campo de la *vida artificial* [ALife] hoy en pleno desarrollo. Uno de los temas reiterativos en la bibliografía de ALife es el problema “ $N = 1$ ”, el problema de distinguir entre los aspectos esenciales y los accidentales de la vida con base en tan sólo una muestra de vida.

Sería ideal que la ciencia de la biología abarcara todas las formas de vida. Sin embargo, en la práctica, la biología se ha limitado al estudio de una sola forma de vida, la vida en la Tierra. Puesto que la biología se basa en una muestra de tan sólo un espécimen, no podemos saber cuáles son los aspectos de la vida exclusivamente terráqueos y cuáles los aspectos generales, característicos de toda la vida.⁸

Uno de los objetivos de ALife es incrementar N , y al hacerlo, generar una definición de la vida que nos diga cuáles aspectos de ésta son esenciales para la vida en y por sí misma. De la misma manera que la “inteligencia artificial fuerte” afirma que algunos sistemas de computación en las actuales o casi actuales computa-

⁷ D. Dennett, *Darwin's Dangerous Idea*, Simon & Schuster, Nueva York, 1995.

⁸ T. S. Ray, *op. cit.*, p. 111.

doras no representan meras simulaciones del pensamiento, sino que son formas de pensamiento, los defensores de la “vida artificial fuerte” alegan que algunos modelos computacionales de interacciones aparentemente vivientes no son simulaciones de la vida, sino formas de vida. Son modelos vivientes.

Los defensores de la inteligencia artificial fuerte alegan que cualquier sistema que se organice correctamente es un sistema cognitivo. El que un sistema piense o no es algo que se da con independencia de su constitución física. La esencia de la mente es la forma, la organización o la función: es decir, una propiedad abstracta. Puesto que los aspectos esenciales de la vida mental no se vinculan a una implementación física específica, el pensamiento es *sustrato-neutral*. Las propiedades mentales son funcionales no físicas. La vida artificial fuerte se modela con base en esta línea argumental. El estar vivo es un fenómeno *sustrato-neutral*. La vida es un aspecto de la forma no de la materia. Cualquier sistema con la correcta organización o estructura es un sistema viviente.

La vida es una propiedad de la forma no de la materia, un resultado de la organización de la materia, más que algo que sea inherente a la materia misma. Ni los nucleótidos ni los aminoácidos ni cualquier otra cadena de carbono molecular tienen vida —pero si se ensamblan correctamente, el comportamiento dinámico que emerge de sus interacciones es lo que llamamos vida—. La vida se basa en los efectos, no en las cosas —la vida es una especie de conducta, no una especie de sustancia— y como tal está compuesta de conductas sencillas, no de sustancias sencillas.⁹

Y por lo tanto

[...] si es posible abstraer la forma lógica de una máquina de su *hardware* físico, es natural preguntarse si es posible abstraer la forma lógica de un organismo de su *wetware* bioquímico.¹⁰

Según este punto de vista, las estructuras de datos computacionales de, por ejemplo, el famoso programa Tierra de Thomas Ray, serían estructuras vivientes, no solamente ilustraciones de la vida.

Para nosotros estos planteamientos no son válidos en absoluto. Primero, la distinción forma/materia, distinción en que descansa la idea básica, equivale a una dicotomía insostenible. No existe ningún nivel de función o de organización

⁹ C. G. Langton, *op. cit.*, p. 53.

¹⁰ *Ibid.*, p. 55.

que descansen en un solo nivel de materia. Más bien, existe una cascada de descripciones de cualquier sistema en particular, cada vez más abstractas o menos abstractas. En la filosofía de la psicología, fuente original de la distinción función/realización, William Lycan ha criticado firmemente el “duonivelismo”.¹¹ En la famosa descripción de la estructura de las teorías psicológicas que hizo David Marr,¹² hay por lo menos dos niveles funcionales. El nivel superior describe la tarea que el sistema psicológico realiza. En el caso de la vista, Marr afirma que la tarea consiste en interpretar el mundo a partir de objetos coloreados tridimensionales y móviles, utilizando como datos la serie de estímulos de la retina. Un nivel intermedio podría describir cómo el sistema procesa la información a fin de llevar a cabo esta tarea, detallando los algoritmos mediante los cuales los estímulos retinales se transforman en representaciones del mundo. El nivel inferior describe cómo se implementan físicamente en el cerebro estos procesos computacionales. Muchos autores han propuesto diversos niveles computacionales o algorítmicos de la descripción entre el nivel superficial de la descripción de la tarea y cualquier descripción directa de la estructura del cerebro. Lycan ha señalado que muchas de las que pretenden ser descripciones de la “realización física” de la mente son en realidad descripciones de la función. Las sinapsis, las conexiones entre las células neurales, tienen muchas formas radicalmente diferentes, pero generalmente podemos hacer abstracción de tales detalles y describir las sinapsis mediante su función: la transferencia de la excitación de una célula a otra.

El mismo marco de multiniveles se corresponde exactamente con los sistemas biológicos. En algunos casos, una descripción muy abstracta, puramente informativa, de un genoma, podría ser apropiada. En otros, nos interesan los detalles físicos de la estructura de la molécula de ADN; por ejemplo, una explicación de la formación de su espiral. Otros casos requieren grados intermedios de descripción. Hay todo un lenguaje genético —los intrones y los exones, el cruzamiento, la duplicación y la reparación de los genes— que es funcional en la forma que hace abstracción de los intrincados detalles de los mecanismos moleculares (algunos de los cuales de hecho aún se desconocen), pero que no es totalmente abstracto. Éste ciertamente no es un lenguaje de la forma, como opuesto a un lenguaje de la materia. Así, la tesis de la neutralidad del sustrato descansa en una dicotomía falsa.

Además, nosotros pensamos que la idea de que las simulaciones son muestras o ejemplos de vida está condicionada innecesariamente por la fortuna, puesto

¹¹ W. G. Lycan, “The Continuity of Levels of Nature”, en W. G. Lycan (comp.), *Mind and Cognition*, Blackwell, Oxford, 1990, pp. 77-96.

¹² D. Marr, *Vision*, W. H. Freeman, Nueva York, 1980.

que la importancia de los modelos de vida artificial no depende de que supuestamente puedan crear la vida. El problema de $N = 1$ es ciertamente un serio obstáculo para la comprobación de conjeturas en la biología universal. Pero el problema de $N = 1$ se ha exagerado y, en todo caso, el problema de la comprobación no se soluciona mediante la alegación de que las simulaciones computacionales están vivas. Claro es que la exobiología sería grandiosa si la pudiéramos realizar; un mundo-vida genuinamente independiente sin duda nos podría decir muchas cosas importantes sobre lo que es auténticamente un proceso biológico y sobre lo que no lo es. Pero el problema de la biología universal se puede abordar desde ahora mediante la construcción de teorías específicas con diferentes implicaciones para las diversas posibilidades evolutivas y ecológicas y que puedan comprobarse mediante su aplicación al enorme y variado experimento que actual y realmente existe para nosotros. No poseemos una maravillosa serie de teorías que se hayan confirmado adecuadamente y que sean empíricamente equivalentes en relación con la vida en la Tierra, pero que contengan diferentes indicaciones sobre cómo podría haber sido la vida. El problema de $N = 1$ podría empezar a ser crítico si tenemos que escoger entre las teorías empíricamente bien confirmadas y las teorías localmente equivalentes: teorías que hagan las mismas predicciones sobre la vida aquí —predicciones que se confirmen— pero que hagan diferentes predicciones sobre cómo podría ser la vida en otros lugares. Sin embargo, aún no se nos ha proporcionado la grata posibilidad de semejante elección.

Las simulaciones evolutivas habrán de desarrollar un papel importante en la construcción de las propiedades de estas teorías de la vida. Tales modelos podrían comprobar las condiciones bajo las cuales surgirían fenómenos específicos de tipo genético, ecológico o evolutivo. ¿En qué circunstancias podría desarrollarse un tercer sexo? ¿En qué circunstancias podría estar dirigida la variación en vez de ser aleatoria? Serían muy atractivos los modelos bien calibrados que mostraran la evolución de fenómenos exóticos que no aparecen en el mundo natural. Pero sólo podrían desempeñar esta función como representaciones, no como manifestaciones de procesos biológicos.

Al realizar las simulaciones se intenta descubrir lo que estos modelos predicen, cuando tales predicciones son inaccesibles para las técnicas analíticas. La gran virtud de estas simulaciones es que se puede jugar con diversos parámetros a fin de obtener un indicio de cuáles son los resultados firmes a través de los cambios de gradación sutiles en el modelo, y cuáles no lo son. Así, por ejemplo, el modelo de Nilsson sobre la evolución de los ojos resulta impresionante porque, si bien los parámetros se escogen conservadoramente, los ojos evolucionan con

gran velocidad, según los estándares geológicos.¹³ Las simulaciones son importantes, y en la sección 15.3 habremos de examinar más profundamente su mensaje.¹⁴ Pero nada de lo que estos modelos nos dicen depende de que pensemos que realmente están vivos. Nosotros pensamos que la idea de que estos programas son ejemplos de la vida, en vez de representaciones de la vida, trivializa las cuestiones reales que motivan a la biología universal. Pensemos nuevamente en los tres sexos. Nos gustaría saber si pudiera haber o no circunstancias que efectivamente favorecieran la selección de tres sexos. Es probable que sólo los modelos de la evolución nos ayuden a comprender este problema. Pero para hacerlo, tales modelos tendrán que estar bien calibrados. Sus suposiciones tendrán que ser realistas. Supongamos que aceptáramos que las estructuras de datos que se manipulan en un programa como el de Tierra fueran estructuras vivientes. Supongamos, además, que aceptáramos que el sexo no se define por el intercambio físico de ácidos nucleicos, sino que se define abstracta y funcionalmente como afirma el programa de la vida artificial. Según este concepto abstracto, el sexo es intercambio de información. Así, sería sexo cualquier intercambio de información entre ciertas estructuras de datos representativas antes de que se replicaran. Es indudable que es posible desarrollar modelos con un triple intercambio de información entre las estructuras de datos. Por lo tanto, según esta definición de la vida artificial, podría existir la vida con tres sexos. Pero ésta sería una solución trivial del problema; es demasiado barata. Si el modelo no representa fielmente las restricciones para los entes vivientes físicamente incorporados —por ejemplo, las restricciones para el desarrollo— entonces no nos podría enseñar lo que queremos saber sobre la posibilidad de los tres sexos. Si representara fielmente esas restricciones, entonces podríamos aprender lo que quisiéramos saber al respecto. Pero nada se ganaría mediante la insistencia de que el modelo es una manifestación, tanto como una representación, de la vida.

BIBLIOGRAFÍA

Bedau, M. A., "The Nature of Life", en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Oxford, 1996, pp. 322-360.

¹³ D.-E. Nilsson y S. Pelger, "A Pessimistic Estimate of the Time Requires for an Eye to Evolve", *Proceedings of the Royal Society of London B*, 256: 53-58, 1994; véase también R. Dawkins, *Climbing Mount Improbable*, op. cit.

¹⁴ La sección 15.3 no se incluyó en esta obra. [Comps.]

- Dawkins, R., *Climbing Mount Improbable*, W. W. Norton, Nueva York, 1996. [Versión en español: *Escalando el monte improbable*, trad. de Joandomenec Ross, Tusquets, Barcelona, 2008.]
- , *The Blind Watchmaker*, W. W. Norton, Nueva York, 1986. [Versión en español: *El relojero ciego*, trad. de Manuel Arroyo Fernández, Labor, Barcelona, 1989.]
- Dennett, D., *Darwin's Dangerous Idea*, Simon & Schuster, Nueva York, 1995. [Versión en español: *La peligrosa idea de Darwin: evolución y significados de la vida*, trad. de Cristóbal Pera Blanco-Morales, Galaxia Gutenberg, España, 1990.]
- Kirchner, J. W., "The Gaia Hypotheses: Are They Testable? Are They Useful?", en S. Schneider y P. J. Boston (comps.), *Scientists on Gaia*, MIT Press, Cambridge, 1991, p. 41.
- Langton, C. G., "Artificial Life", en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Oxford, 1996, pp. 39-94.
- Lycan, W. G., "The Continuity of Levels of Nature", en W. G. Lycan (comp.), *Mind and Cognition*, Blackwell, Oxford, 1990, pp. 77-96.
- Marr, D., *Vision*, W. H. Freeman, Nueva York, 1980. [Versión en español: *Vision: una investigación basada en el cálculo de la representación y el procesamiento humano de la información visual*, trad. de Tomás del Amo Martín, Alianza, Madrid, 1985.]
- Nilsson, D.-E., y S. Pelger, "A Pessimistic Estimate of the Time Requires for an Eye to Evolve", *Proceedings of the Royal Society of London B*, 256: 53-58, 1994.
- Ray, T. S., "An Approach to the Synthesis of Life", en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Oxford, 1996, pp. 111-145.
- Sterelny, K., y P. Griffiths, *Sex and Death: An Introduction to Philosophy of Biology*, The Chicago University Press, Chicago, 1999.

Richard Dawkins*

XXIX. EL DARWINISMO UNIVERSAL**

EXISTE LA muy divulgada creencia, basada en la estadística, de que la vida ha surgido muchas veces en muchos lugares del universo.¹ Aunque las formas de vida alienígenas pudieran mostrar disparidades corporales, es probable que en toda la vida de todos los lugares del universo ciertos principios sean fundamentales. Yo pienso que entre éstos predominarán los principios del darwinismo. La teoría de la evolución mediante la selección natural que Darwin propuso es más que una teoría local que explica la existencia y la forma de la vida en la Tierra. Es probablemente la única teoría que *puede* explicar adecuadamente los fenómenos que asociamos con la vida.

No me ocuparé de las características de otros planetas. No especularé sobre las bioquímicas alienígenas basadas en cadenas de silicio o sobre las neurofisiologías alienígenas basadas en chips de silicio. La perspectiva universal que adopto es mi manera de dramatizar la importancia del darwinismo para nuestra propia biología terráquea, y la mayoría de los ejemplos que daré de ahí provendrán. Sin embargo, también pienso que los “exobiólogos” que especulan sobre la vida extraterrestre deberían utilizar más los razonamientos evolucionistas. Sus escritos han mostrado gran riqueza especulativa respecto a cómo podría estar compuesta la vida extraterrestre, pero gran pobreza respecto a cómo podría *evolucionar*. Por tanto, este ensayo deberá verse, primero, como un argumento sobre la importancia general de la teoría darwiniana de la selección natural; segundo, como una contribución preliminar a la nueva disciplina de la “exobiología evolutiva”.

El “desarrollo del pensamiento biológico”² se derivó sobre todo de la historia

* Como suele suceder, me he beneficiado de las discusiones que sostuve con muchas personas, en especial con Mark Ridley, que también hizo una crítica del manuscrito, y con Alan Grafen. El doctor F. J. Ayala me señaló un error importante en la versión original leída de este trabajo.

** Este artículo apareció originalmente en D. S. Bendall (comp.), *Evolution from Molecules to Man*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983, pp. 131-144.

¹ I. Asimov, *Extraterrestrial Civilizations*, Pan, Londres, 1979; J. Billingham, *Life in the Universe*, MIT Press, Cambridge, 1981.

² E. Mayr, *The Growth of Biological Thought*, Harvard University Press, Cambridge, 1982.

del triunfo darwiniano sobre las demás explicaciones de la existencia. El arma principal de este triunfo comúnmente se describe como *evidencia*. Se dice que el defecto de la teoría de Lamarck es que sus premisas son factualmente erróneas. En palabras de Mayr: “Si se aceptan sus premisas, la teoría de Lamarck fue una teoría de la adaptación tan legítima como la de Darwin. Desafortunadamente, estas premisas no resultaron ser válidas”. Pero yo pienso que es posible decir algo aún más contundente: *aun aceptando sus premisas*, la teoría de Lamarck no es una teoría de la adaptación tan legítima como la de Darwin porque, a diferencia de ésta, en principio no es capaz de hacer la tarea que le pedimos: dar una explicación de la complejidad adaptativa, la complejidad organizada. Creo que lo mismo se puede decir de todas las teorías que jamás se han propuesto para explicar el mecanismo de la evolución, excepto de la teoría de la selección natural darwiniana. Siendo así, el darwinismo se alza en un pedestal más sólido que una columna constituida tan sólo por los datos.

Ahora bien, me he referido a las teorías de la evolución que no pueden “hacer la tarea que les pedimos”. Todo gira en torno a la cuestión de cuál es esta tarea. Sería distinta la respuesta de diferentes personas. Por ejemplo, a algunos biólogos les emociona el “problema de las especies”, mientras que a mí este “misterio de misterios” nunca me ha entusiasmado. Según algunos, la cosa principal que cualquier teoría de la evolución tiene que explicar es la diversidad de la vida —la cladogénesis—. Otros acaso le piden a su teoría una explicación de los cambios observados en la constitución molecular del genoma. No pretendo que ninguna de estas personas acepte mi punto de vista. Todo lo que puedo hacer es clarificarlo, a fin de que el resto de mi argumento sea claro.

Estoy de acuerdo con Maynard Smith³ en que “la tarea principal de cualquier teoría de la evolución es explicar la complejidad adaptativa, es decir, explicar la misma serie de hechos que Paley utilizó como pruebas de la existencia de un Creador”. Supongo que a la gente como yo se les podría calificar de neopaleianos o, acaso, “paleianos transformados”. Todos coincidimos con Paley en que la complejidad adaptativa exige un tipo muy especial de explicación: ya sea un diseñador, como Paley decía, o algo como una selección natural que hace la tarea de un diseñador. Sin duda, la complejidad adaptativa es probablemente el mejor diagnóstico de la presencia de la vida misma.

³ J. Maynard Smith, “The Status of Neo-Darwinism”, en C. H. Waddington (comp.), *Sketching Theoretical Biology: Toward a Theoretical Biology*, vol. II, Edinburgh University Press, Edimburgo, 1969, pp. 82-89.

LA COMPLEJIDAD ADAPTATIVA COMO DIAGNÓSTICO DE LA VIDA

Si nos encontramos con algo, en cualquier parte del universo, cuya estructura sea compleja y tenga la indudable apariencia de haber sido diseñado para algo, entonces esa cosa está viva o alguna vez lo estuvo, o es un artefacto creado por algo que está o estuvo vivo. Esto vale para los fósiles o los artefactos, ya que su descubrimiento en cualquier planeta ciertamente serviría como prueba de la vida allí mismo.

La complejidad es un concepto estadístico.⁴ Una cosa que sea compleja es una cosa estadísticamente improbable, algo cuya probabilidad *a priori* de llegar a ser es bajísima. La cifra de los ordenamientos posibles de los 10^{27} átomos del cuerpo humano es inconcebiblemente enorme. Entre los ordenamientos posibles, en tan sólo unos cuantos se podría observar un cuerpo humano. Pero, por sí mismo, no es éste el punto esencial. Cualquier configuración de átomos que pudiera existir es, *a posteriori*, única, tan “improbable”, retrospectivamente, como cualquier otra. El punto es que entre todos los posibles ordenamientos de esos 10^{27} átomos, sólo un número minúsculo podría constituir cualquier cosa parecida, incluso remotamente, a una máquina que trabajara para mantenerse viva y para reproducirse. Los seres humanos no sólo son estadísticamente improbables en el sentido trivial de la retrospección: su improbabilidad estadística se relaciona con las restricciones apriorísticas del diseño. Los seres humanos somos *adaptativamente* complejos.

Ha sido acuñado el término “adaptivista” como una calificación peyorativa de quien suponga “sin mayores pruebas que todos los aspectos de la morfología, fisiología y conducta de los organismos representan soluciones de problemas, soluciones adaptativas óptimas de problemas”.⁵ Yo he respondido a esto en otro libro.⁶ Aquí habré de ser un adaptivista en el sentido mucho más leve de que sólo me *interesaré* en aquellos aspectos de la morfología, fisiología y conducta de los organismos que representen soluciones adaptativas a los problemas. Similarmente, un zoólogo puede especializarse en los vertebrados sin negar la existencia de los invertebrados. Me interesaré en las adaptaciones indiscutibles porque yo las

⁴ J. W. S. Pringle, “On the Parallel between Learning and Evolution”, *Behaviour*, 3: 90-110, 1951.

⁵ R. C. Lewontin, “Sociobiology as an Adaptationist Program”, *Behavioral Science*, 24: 5-14, 1983; R. C. Lewontin, “Gene, Organism, and the Environment”, en D. S. Bendall (comp.), *op. cit.*, pp. 273-286.

⁶ R. Dawkins, *The Extended Phenotype*, W. H. Freeman, Oxford, 1982, capítulo 3.

he definido como las características que diagnostican la existencia de la vida, de toda la vida en todo el universo, en la misma forma que el zoólogo de los vertebrados se podría interesar en los espinazos porque los espinazos representan la característica específica de todos los vertebrados. A veces requeriré un ejemplo de una adaptación indiscutible, y el ojo, el tan prestigiado ojo a través de los tiempos, como siempre servirá de modelo.⁷ “En relación con el escrutinio del instrumento, la misma prueba que existe para decir que el ojo se hizo para la vista, existe para decir que el telescopio se hizo para ayudar a la vista, siendo que ambos se ajustan a las leyes que regulan la transmisión y la refracción de los rayos de la luz.”⁸

Si llegáramos a encontrar un instrumento similar en el suelo de otro planeta, necesitaríamos una explicación especial. Ya sea que Dios existe o, si entendemos el universo como un conjunto de fuerzas físicas ciegas, que éstas se tuvieron que desplegar en una forma muy singular. No se puede decir lo mismo de los objetos no vivientes como la Luna o el Sistema Solar (véase *infra*). Fueron correctas las intuiciones de Paley:

Siempre he pensado que la astronomía *no* es el mejor medio para demostrar la obra de un Creador inteligente [...] La sencillez misma de la apariencia [de los cuerpos celestes] está en su contra [...] Ahora deducimos el diseño a partir de la relación, la aptitud y la correspondencia de las *partes*. Por lo tanto cierto grado de *complejidad* es necesario para someter a un tema esta especie de argumento. Pero los cuerpos celestes, excepto acaso el anillo de Saturno, no pueden observarse por nosotros en ningún sentido como compuestos de partes.⁹

Una piedrita transparente, pulida por el mar, podría servir, como un lente, para enfocar una imagen real. El hecho de que sea un dispositivo óptico eficaz no resulta particularmente interesante porque, a diferencia de un ojo o un telescopio, es demasiado sencillo. No sentimos la necesidad de referirnos al concepto del diseño. El ojo y el telescopio tienen muchas partes que se ajustan todas entre sí y que funcionan combinadamente a fin de lograr el mismo fin. La piedrita pulida tiene muchos menos aspectos funcionales que se adaptan entre sí: la coincidencia de la transparencia, el alto índice refractivo y las fuerzas mecánicas que han pulido la superficie, dándole una forma curvada. No es particularmente rara

⁷ W. Paley, *Natural Theology*, J. Vincent, Oxford, 1828; C. R. Darwin, *The Origin of Species*, Penguin, Londres, 1968. También puede consultarse cualquier tratado fundamentalista.

⁸ W. Paley, *op. cit.*, vol. 1, p. 17.

⁹ *Ibid.*, vol. 2, pp. 146-147.

la probabilidad de que ocurra esta triple coincidencia. No requiere ninguna explicación especial.

Compárese lo anterior con la forma en que un científico utiliza el cálculo estadístico para decidir qué valor P debe aceptarse como prueba de un efecto en un experimento. Cuando observa una coincidencia demasiado grande, en principio inaceptable, tiene que utilizar el discernimiento y la duda, casi la inclinación personal, para diagnosticarla. Pero, ya sea el científico un estadístico precavido o un estadístico atrevido, existen algunas adaptaciones complejas cuyo “valor P ”, su valor de probabilidad, es tan impresionante que nadie dudaría en diagnosticarlas como formas de vida (o como artefactos diseñados por un ente viviente). Mi definición de la complejidad viviente es, efectivamente, “que la complejidad es demasiado grande como para haber resultado de una sola coincidencia”. Según este ensayo, el problema que cualquier teoría de la evolución debe solucionar es cómo aparece y de dónde se deriva la complejidad adaptativa viviente.

En el libro de Mayr al que me referí antes,¹⁰ aparece una lista de las seis teorías de la evolución más claramente distintivas que según él jamás hayan sido propuestas en la historia de la biología. Voy a utilizar esta lista para introducir los principales apartados de este trabajo. En cada caso, en vez de preguntarme cuáles son las evidencias al respecto, en pro o en contra, yo me preguntaré si la teoría es capaz *en principio* de cumplir con la tarea de explicar la existencia de la complejidad adaptativa. Tras examinar las seis teorías en orden, concluiré que sólo la teoría 6, la selección darwiniana, está a la altura de la tarea.

*Teoría 1: La capacidad integrada de incrementar la perfección
o de encaminarse hacia la perfección*

Para la mentalidad moderna, ésta no es en realidad una teoría, y yo no me molestaré en discutirla. Es obviamente una teoría mística que no explica nada de lo que no haya supuesto para empezar.

Teoría 2: El uso y desuso más la herencia de los caracteres adquiridos

Será conveniente discutir las dos partes de esta teoría separadamente.

¹⁰ E. Mayr, *op. cit.*

El uso y desuso. Es un hecho conocido que en este planeta los cuerpos vivientes a veces incrementan su adaptabilidad gracias al uso. Los músculos que se ejercitan tienden a aumentar su tamaño. Los cuellos que se estiran cuando la mirada escruta las cimas de los árboles se pueden ir alargando. Es concebible que si en algún planeta tales mejoras adquiridas se pudieran incorporar en la información hereditaria, el resultado sería la evolución adaptativa. Es ésta la teoría que con frecuencia se asocia con Lamarck, pero había más en lo que Lamarck decía. Crick dice al respecto:¹¹ “Hasta donde yo sepa, nadie ha explicado, con razonamientos teóricos *generales*, por qué semejante mecanismo sería menos eficiente que la selección natural”. En esta parte y en la siguiente yo plantearé dos objeciones teóricas generales, en relación con el lamarckismo, del tipo que yo sospecho Crick exigía. Ambas las he expuesto anteriormente,¹² así que aquí lo haré con brevedad. Primero, las limitaciones del principio del uso y el desuso.

El problema está en la tosquedad y la imprecisión de la adaptación que el principio del uso y el desuso es capaz de explicar. Consideremos las mejoras evolutivas que tuvieron que haber ocurrido durante la evolución de un órgano como el ojo, preguntándonos cuáles pudieron haber resultado del uso y el desuso. ¿Aumenta la transparencia de un lente su “uso”? No, los fotones no aclaran la transparencia cuando atraviesan el lente. Los lentes y los demás componentes ópticos tuvieron que haber reducido, a lo largo del tiempo de la evolución, sus aberraciones esféricas y cromáticas; ¿podía haber resultado lo mismo del incremento del uso? Seguramente no. El ejercicio pudo haber fortalecido los músculos del iris, pero no pudo haber construido el fino sistema de retroalimentación que controla estos músculos. El mero bombardeo de una retina con luz coloreada no puede promover la existencia de los conos sensibles al color, ni conectar sus emisiones a fin de proporcionar la visión a color.

Las teorías de tipo darwiniano, claro es, no son incapaces de explicar todas estas mejoras. Cualquier mejora en la precisión visual podía influir significativamente en la supervivencia. Cualquier reducción, por minúscula que fuera, de la aberración esférica podía evitar que un ave veloz malinterpretara fatalmente la posición de un obstáculo. Cualquier mejora, por minúscula que fuera, en la percepción visual de los detalles coloreados podía mejorar la detección de las presas camufladas. La base genética de cualquier mejora, por leve que sea, habrá de predominar en el *pool* genético. La relación entre la selección y la adaptación es directa y está muy bien acoplada. En cambio, la teoría lamarckiana depende de un

¹¹ F. Crick, *Life Itself*, McDonald, Londres, 1982, p. 59.

¹² R. Dawkins, “The Necessity of Darwinism”, *New Science*, 94: 130-132, 1982.

acoplamiento mucho más tosco: la regla de que, mientras más use un animal cierta parte de sí mismo, más grande deberá ser esa parte. La regla podría tener ocasionalmente alguna validez, pero no generalmente y, como herramienta para esculpir la adaptación, equivale a un hacha sin filo, en comparación con los finos cinceles de la selección natural. Esta cuestión es universal. No depende de los hechos detallados de la vida en este planeta en particular. En lo mismo se basan mis dudas sobre la herencia de los caracteres adquiridos.

La herencia de los caracteres adquiridos. Aquí, el problema está en que los caracteres adquiridos no siempre son mejoras. No hay razones para que lo sean y, de hecho, la gran mayoría de los caracteres adquiridos se deben a los accidentes. Tal cosa no es algo que sólo ocurra en la Tierra. Tiene un fundamento universal. En un sistema complejo y razonablemente bien adaptado, las cosas que pueden empeorar su funcionamiento son muchísimas más que las cosas que lo pueden mejorar.¹³ La evolución lamarckiana sólo puede avanzar en la dirección de la adaptación cuando existe algún mecanismo —la selección— que identifique, entre las características adquiridas, las que representan mejoras de las que no las representan. Únicamente deberían inscribirse en la línea germinal las mejoras.

Aunque no se refería al lamarckismo, Lorenz¹⁴ destacó algo similar en el caso de la conducta aprendida, acaso el tipo de adaptación adquirida más importante. Un animal aprende a ser un mejor animal en el curso de su vida. Aprende a comer cosas dulces, digamos, incrementando así sus posibilidades de supervivencia. Pero hay algo inherentemente nutricional en las cosas dulces. Algo, presumiblemente la selección natural, ha integrado en el sistema nervioso la regla arbitraria: “considera las cosas dulces como algo bueno”, y esto funciona porque la sacarina no existe en la naturaleza, pero el azúcar sí.

De manera similar, la mayoría de los animales aprenden a evitar las situaciones que en el pasado han sido dolorosas. Los estímulos que para los animales son dolorosos tienden a asociarse con los accidentes experimentados en su vida natural y con la posibilidad real de la muerte. Pero, aquí nuevamente, la conexión tiene que haber sido integrada en el sistema nervioso por la selección natural, puesto que no es una conexión obvia y necesaria.¹⁵ Uno puede imaginar fácilmente la selección artificial de una raza de animales que sintieran placer al accidentarse y que sintieran dolor al mejorar su estado fisiológico. Si el aprendizaje es una

¹³ R. A. Fisher, *The Genetical Theory of Natural Selection*, Dover, Nueva York, 1958.

¹⁴ K. Lorenz, *Evolution and Modification of Behavior*, Methuen, Londres, 1966.

¹⁵ M. Dawkins, *Animal Suffering: The Science of Animal Welfare*, Chapman & Hall, Londres, 1980.

mejora adaptativa, tiene que existir, como dice Lorenz, un mecanismo innato de enseñanza, “una institutriz innata”. Este principio es válido aun cuando los elementos instructores reforzadores son “secundarios”, habiéndose aprendido por asociación con los elementos de instrucción primarios.¹⁶

Pasa lo mismo con las características morfológicas. La piel de los pies se vuelve más dura y resistente con el caminar. El endurecimiento de la piel es una adaptación adquirida, pero no es obvio por qué el cambio se dio así. En las máquinas hechas por el hombre las partes más sujetas al desgaste se vuelven más frágiles, no más duras, por motivos obvios. ¿Por qué sucede lo contrario con los pies? Porque, fundamentalmente, la selección natural ha estado funcionando en el pasado para asegurar una adaptación positiva, en vez de una negativa, al desgaste.

La relevancia de esto en la supuesta evolución lamarckiana es que en ella tiene que existir una profunda cimentación darwiniana, incluso cuando exista una estructura lamarckiana en la superficie: la elección darwiniana de cuáles características potencialmente adquiribles se adquirirán y heredarán efectivamente. Ya he alegado en otro sitio¹⁷ que lo mismo se puede decir respecto a una reciente, muy divulgada teoría inmunológica de la adaptación lamarckiana.¹⁸ Los mecanismos lamarckianos no pueden ser fundamentalmente responsables de la evolución adaptativa. Incluso si en algún planeta se heredaran las características adquiridas, la evolución seguiría dependiendo de una guía darwiniana que encaminara su adaptación.

Teoría 3: La inducción directa a través del ambiente

La adaptación, como ya vimos, es una avenencia entre el organismo y el medio ambiente. La serie de organismos concebibles es más extensa que la serie conocida. También existe una serie de ambientes concebibles que es más amplia que la serie conocida. Ambas subseries se compaginan hasta cierto punto, y la compaginación es la adaptación. Podemos expresar de otra manera el hecho diciendo que la información del medio ambiente se halla presente en el organismo. En algunos, pocos, casos esto resulta vívidamente literal —una rana lleva en la espalda la imagen de su medio ambiente—. Este tipo de información lo llevan usualmente los animales en el sentido menos literal de que un observador entrenado puede,

¹⁶ P. P. G. Bateson, “Rules for Changing the Rules”, en D. S. Bendall (comp.), *op. cit.*, pp. 483-508.

¹⁷ R. Dawkins, *The Extended Phenotype*, *op. cit.*, pp. 164-177.

¹⁸ E. J. Steele, *Somatic Selection and Adaptive Evolution*, Williams & Wallace, Toronto, 1979.

al disecar un animal desconocido, reconstruir muchos de los detalles de su medio ambiente natural.

Ahora bien, ¿cómo se traslada la información del medio ambiente al animal? Lorenz¹⁹ dice que esto se logra de dos maneras: mediante la selección natural y mediante el aprendizaje reforzado, pero que ambos son procesos selectivos en sentido amplio.²⁰ Teóricamente, hay un método alternativo mediante el cual el medio ambiente imprime su información en el organismo, el de la “instrucción” directa.²¹ Algunas teorías sobre el funcionamiento del sistema inmunológico son “instructivas”: se cree que las moléculas anticuerpos se forman directamente al amoldarse en torno a las moléculas antigénicas. Sin embargo, la teoría hoy más aceptada es la selectiva. Para mí la “instrucción” es un sinónimo de la “inducción directa por el medio ambiente” de la teoría 3 de Mayr. Ésta no siempre se diferencia claramente de la teoría 2.

La instrucción es el proceso mediante el cual la información fluye directamente desde el medio ambiente hasta incorporarse en un animal. Acaso sería justificado calificar de instructivos el aprendizaje mediante la imitación, el aprendizaje latente y la impronta, pero en aras de la claridad es mejor utilizar un ejemplo hipotético. Imaginemos un animal de algún planeta cuyo camuflaje es parecido al del tigre terráqueo. Vive en un hábitat de hierbas con largas y delgadas hojas, a las que se parecen mucho las manchas de su propia piel. En nuestro planeta este tipo de adaptación se derivaría de la selección de la variación aleatoria genética, pero en el planeta imaginario se deriva de la instrucción directa. Los animales se vuelven pardos excepto en los lugares de su piel protegidos del “sol” por las hojas. Por lo tanto sus manchas se han adaptado con gran precisión al hábitat donde reciben la luz “solar”, y en este mismo hábitat es donde tendrán que sobrevivir. La información proveniente del hábitat, en este caso la de la forma de las largas hojas de la hierba, ha fluido hasta el animal, incorporándose en la pigmentación de su piel.

La adaptación instructiva requiere la herencia de los caracteres adquiridos a fin de poder dar origen a un cambio evolutivo permanente o progresivo. La “instrucción” recibida en una generación se debe “recordar” en la información genética (o el equivalente de ésta). Este proceso es en principio acumulativo y progresivo. No obstante, para que el almacén genético no se sobrecargue con las acumulaciones de las sucesivas generaciones, tiene que existir algún mecanismo que descarte

¹⁹ K. Lorenz, *op. cit.*

²⁰ J. W. S. Pringle, *op. cit.*

²¹ A. Danchin, “Thèmes de la biologie: Théories instructives et théories sélectives”, *Revue des Questions Scientifiques*, 156: 151-164, 1979.

las “instrucciones” indeseables y retenga las deseables. Yo sospecho que tal cosa nos debe llevar, una vez más, a la necesidad de algún tipo de proceso selectivo.

Imaginemos, por ejemplo, una forma de vida del tipo de los mamíferos en la cual un robusto “nervio umbilical” le permitiera a la madre “descargar” el contenido entero de su memoria en el cerebro del feto. Esta tecnología existe aun en nuestro sistema nervioso: el *corpus callosum* puede enviar grandes cantidades de información desde el hemisferio derecho al izquierdo. Gracias a un nervio umbilical, la experiencia y la sabiduría de cada generación podrían utilizarse automáticamente por la siguiente, lo cual parecería muy deseable. Pero sin un filtro selectivo, al cabo de unas cuantas generaciones la carga informativa sería incontrolablemente grande. Una vez más nos encontramos con la necesidad de una cimentación selectiva. Dejaré esta cuestión aquí, pero en relación con la adaptación instructiva (y por extensión con todos los tipos de teorías lamarckianas) quiero señalar un punto todavía.

Este punto consiste en que hay una vinculación lógica entre las dos principales teorías de la evolución adaptativa —la selección y la instrucción— y las dos principales teorías del desarrollo embrionario —la epigénesis y el preformacionismo—. La evolución instructiva sólo puede funcionar si la embriología es preformacionista. Si la embriología es epigenética, como lo es en nuestro planeta, la evolución instructiva no puede darse. Ya he expuesto el argumento anteriormente,²² así que aquí no haré más que abreviarlo.

Los procesos embrionarios tienen que ser reversibles para que sea posible heredar los caracteres adquiridos: el cambio fenotípico tendrá que ser impreso retroactivamente en los genes (o su equivalente). Si la embriología fuera preformacionista —los genes componen un auténtico plano detallado— entonces sería efectivamente reversible. Se puede traducir reversiblemente a una casa como su plano. Pero si el desarrollo embrionario es epigenético, si, como sucede en nuestro planeta, la información genética es más como la receta de un pastel²³ que como el plano de una casa, entonces el desarrollo embrionario es irreversible. No hay una conexión uno a uno entre los elementos de un genoma y los elementos de un fenotipo, como tampoco la hay entre las migas de un pastel y las palabras de una receta. La receta no es un plano que puede reconstruirse a partir del pastel. La transformación de la receta en un pastel no puede revertirse, así como tampoco el proceso de la construcción de un cuerpo orgánico. Por tanto, en cualquier

²² R. Dawkins, *The Extended Phenotype*, op. cit., pp. 174-176.

²³ P. P. G. Bateson, “Specificity and the Origins of Behavior”, *Advances in the Study of Behavior*, 6: 1-20, 1976.

planeta donde la embriología sea epigenética, las adaptaciones adquiridas no podrán ser impresadas retroactivamente en los “genes”.

Esto no significa que no pudiera haber en algún planeta una forma de vida cuya embriología fuera preformacionista. Ésta es una cuestión distinta. ¿Qué probabilidad tendría de existir tal forma de vida? Tendría que ser muy diferente de la nuestra, tanto así que resulta difícil imaginar cómo podría funcionar. Es aún más difícil visualizar la embriología reversible misma. Algún tipo de mecanismo tendría que escanear detalladamente la forma del cuerpo adulto, registrando cuidadosamente, por ejemplo, la exacta localización del pigmento pardo en una piel listada por el efecto de la luz solar, acaso grabándola como una sucesión de cifras codificadas, como lo hace una cámara de televisión. Entonces el desarrollo embrionario interpretaría las cifras escaneadas, como lo hace un aparato de televisión. Yo tengo la idea intuitiva de que existe en principio una objeción a este tipo de embriología, pero no he podido hasta la fecha formularla con claridad. Todo lo que aquí quiero dar a entender es que, si los planetas se dividen en aquellos en que la embriología es preformacionista y en aquellos, como la Tierra, en que la embriología es epigenética, la evolución darwiniana podría sustentarse en ambos tipos de planeta; pero la evolución lamarckiana, incluso si no hubiera otros motivos para dudar de su existencia, sólo podría sustentarse en los planetas preformacionistas —si es que los hay—.

El estrecho vínculo teórico que he expuesto entre la evolución lamarckiana y la embriología preformacionista da origen a una ironía divertida. Aquellos que tienen razones ideológicas para anhelar una idea neolamarckiana de la evolución suelen ser partidarios ardorosos de las ideas epigenéticas “interaccionistas” del desarrollo, posiblemente —he aquí la ironía— por exactamente las mismas razones ideológicas.²⁴

Teoría 4: El saltacionismo

La gran virtud de la idea de la evolución es que ésta explica, a partir de las fuerzas físicas fortuitas y sin recurrir a lo sobrenatural o lo místico, la existencia de adaptaciones indiscutibles cuya improbabilidad estadística es enorme. Ya que *definimos* una adaptación indiscutible como una adaptación que es demasiado compleja como para haber surgido aleatoriamente, ¿cómo es posible que una teoría se

²⁴ A. Koestler, *The Ghost in the Machine*, Hutchinson, Londres, 1967; M. W. Ho y P. T. Saunders, “Adaptation and Natural Selection: Mechanism and Teleology”, en C. M. Barker *et al.* (comps.), *Towards a Liberatory Biology*, Allison & Busby, Londres, 1981, pp. 85-102.

apoye tan sólo en las fuerzas físicas fortuitas? La respuesta —la respuesta del mismo Darwin— es sorprendentemente sencilla, si consideramos hasta qué punto el divino relojero de Paley pudo verse por sus contemporáneos como algo patente que no requería explicación alguna. La clave está en que las partes coadaptadas no tienen que ensamblarse todas *a la vez*. Pueden ensamblarse en etapas pequeñas. Pero tienen que ser realmente *pequeñas*. De otra forma estaríamos de regreso al problema inicial: ¡la creación aleatoria de una complejidad que es demasiado grande como para haber sido creada aleatoriamente!

Nuevamente tomemos el ejemplo del ojo, como un órgano que contiene un gran número, digamos N , de partes independientes coadaptadas. La probabilidad *a priori* de que cualquiera de estos aspectos N se origine fortuitamente es mínima, pero no increíblemente mínima. Es comparable a la probabilidad de que el mar pula una piedrita cristalina a fin de que sirva como una lente. Cualquiera de ambas adaptaciones por sí misma podría haberse originado gracias a fuerzas físicas fortuitas. Si cada uno de los aspectos coadaptados confiere por sí mismo una cierta leve ventaja, entonces el órgano entero con sus muchas partes puede ensamblarse en el curso de un largo periodo de tiempo. Esto es particularmente verosímil en el caso del ojo, cosa que resulta irónica si consideramos el nicho honorífico que tiene en el panteón creacionista. El ojo es, *par excellence*, un caso en que una fracción de un órgano es mejor que la ausencia total del órgano; un ojo sin lente ni pupila, por ejemplo, aun así puede detectar la forma amenazadora de un predador.

Hay que repetirlo, la clave de la explicación darwiniana de la complejidad adaptativa es la sustitución de la suerte instantánea, coincidente, multidimensional, por la suerte gradual y prolongada que se da paso a paso. Claro es que la suerte se involucra. Pero una teoría que amontona la suerte en unas cuantas grandes etapas es más increíble que una teoría que prolonga la suerte en una serie de etapas breves. Esto nos lleva a un principio general de la biología universal: en cualquier lugar del universo donde exista la complejidad adaptativa, ésta se habrá originado gradualmente a través de una serie de pequeñas alteraciones y jamás a través de grandes y repentinos incrementos en la complejidad adaptativa. Debemos rechazar la cuarta teoría de Mayr —el saltacionismo—, como posible explicación de la evolución de la complejidad.

Es casi imposible cuestionar este rechazo. En la definición de la complejidad adaptativa hay una cosa implícita: el hecho de que la única alternativa a la evolución gradual es la magia sobrenatural. Esto no significa que el argumento a favor de la gradualidad sea una tautología sin valor alguno, un dogma infalsificable del

tipo que llena de alegría a los creacionistas y a los filósofos. No es *lógicamente* imposible que un ojo perfectamente formado surja *de novo* en la carne virgen. Pero la posibilidad de que una cosa semejante suceda es simple y estadísticamente insignificante.

Ahora, se ha publicitado reciente y repetidamente que algunos evolucionistas modernos rechazan el “gradualismo” y adopta lo que Turner ha calificado de teorías de la evolución por saltos.²⁵ Puesto que son gente razonable sin tendencias místicas, deben ser gradualistas en el sentido en que aquí utilizo el término: el “gradualismo” al que se oponen tiene que definirse de una manera diferente. Aquí hay en realidad dos confusiones lingüísticas que quiero aclarar una por una. La primera es la común confusión entre “equilibrio puntuado”²⁶ y el verdadero saltacionismo. La segunda es la confusión entre dos tipos teóricamente distintos del saltacionismo.

El equilibrio puntuado no es la macromutación, no es en absoluto la saltación en el sentido tradicional del término. Sin embargo, es necesario discutirlo aquí porque se considera popularmente como una teoría de la saltación, y sus partidarios citan, aprobándola, la crítica que Huxley le hace a Darwin por haber defendido el principio de *Natura non facit saltum*.²⁷ Se califica la teoría del equilibrio puntuado de radical y revolucionaria, diciendo que impugna las suposiciones “gradualistas” de Darwin y de la síntesis neodarwiniana.²⁸ Sin embargo, el equilibrio puntuado se concibió originalmente como algo que la teoría sintética neodarwiniana en verdad debía predecir sobre la base de una escala temporal paleontológica, si se toman en serio las ideas de la especiación alopátrica subyacentes.²⁹ El equilibrio puntuado deriva sus “saltos” mediante la *inserción*, en el “majestuoso desarrollo” de la síntesis neodarwiniana, de largos periodos de estasis, acentuados por repentinos y breves estallidos evolutivos graduales, aunque veloces.

La factibilidad de tal “gradualismo veloz” se dramatiza en un experimento mental de Stebbins.³⁰ Él imagina una variedad de ratón que aumenta evolutivamente su tamaño corporal con una lentitud tan imperceptible que las diferencias en las tasas de crecimiento promedio de las sucesivas generaciones serían total-

²⁵ J. R. Turner, “Review of R. J. Berry, Neo-Darwinism”, *New Scientist*, 94: 160-162, 1982.

²⁶ N. Eldredge y S. J. Gould, “Punctuated Equilibria: An Alternative to Phyletic Gradualism”, en T. J. M. Schopf (comp.), *Models in Paleobiology*, Freeman, Cooper & Co., San Francisco, 1972, pp. 82-115.

²⁷ S. J. Gould, *The Panda's Thumb*, W. W. Norton, Nueva York, 1980.

²⁸ Por ejemplo, R. Lewin, “Evolutionary Theory under Fire”, *Science*, 210: 883-887, 1980.

²⁹ N. Eldredge y S. J. Gould, *op. cit.*

³⁰ G. L. Stebbins, *Darwin to DNA, Molecules to Humanity*, W. H. Freeman, San Francisco, 1982.

mente obliteradas por un error en la verificación de una muestra. Sin embargo, a pesar de la extremada lentitud, el linaje del ratón ideado por Stebbins alcanzaría el tamaño corporal de un elefante grande al cabo de cerca de 60 000 años, un periodo de tiempo que los paleontólogos considerarían tan corto como para calificarlo de instantáneo. El cambio evolutivo, demasiado *lento* para ser detectado por los microevolucionistas, también puede ser demasiado veloz para ser detectado por los macroevolucionistas. Este tipo de “saltación” paleontológica nada tiene que ver con las macromutaciones en una sola generación que, sospecho, Huxley y Darwin tenían en mente cuando debatieron sobre *Natura non facit saltum*. De aquí ha surgido la confusión, acaso porque algunos de los individuos que defienden el equilibrio puntuado también han defendido, por cierto, la macromutación.³¹ Otros han confundido su teoría con la macromutación, o han invocado explícitamente la macromutación como uno de los mecanismos de la puntuación.³²

Respecto a la macromutación, o la verdadera saltación misma, la segunda confusión que quiero aclarar es la de dos tipos de macromutación concebibles. Yo podría con muy poca imaginación denominarlas saltación (1) y saltación (2), pero en cambio, recordando un capricho personal de utilizar los aviones como metáforas, las llamaré “Boeing 747” y “DC-8 modificado”. La saltación 747 es de un tipo inconcebible. Su nombre proviene de la muy citada metáfora de sir Fred Hoyle, la cual se relaciona con su tergiversación del darwinismo.³³ Hoyle comparó la selección darwiniana con un tornado que al pasar sobre un depósito de autos destruidos ensamblara con los restos un Boeing 747 (lo que Hoyle pasó por alto, claro, fue el punto de que la suerte se prolonga en una serie de etapas breves —véase *supra*—). La saltación DC-8 modificado es muy distinta. En principio, no resulta difícil creer en ella. Se relaciona con grandes y repentinos cambios en la *magnitud* de alguna dimensión biológica, sin un gran aumento paralelo en la información adaptativa. Su nombre proviene de un avión que se creó mediante el alargamiento del fuselaje de un avión, el DC-8, que ya existía, pero sin añadir una nueva complejidad significativa. El cambio del DC-8 al DC-8 modificado es un gran cambio dimensional —una saltación, no una serie gradualista de minúsculos cambios—. Pero, a diferencia del cambio de un montón de coches destruidos

³¹ S. J. Gould, “The Meaning of Punctuated Equilibrium and its Role in Validating a Hierarchical Approach to Macroevolution”, en R. Milkman (comp.), *Perspectives on Evolution*, Sinauer, Sunderland, 1982, pp. 83-102.

³² Por ejemplo, S. Stanley, *The New Evolutionary Timetable*, Basic Books, Nueva York, 1981.

³³ F. Hoyle y N. C. Wickramasinghe, *Evolution from Space*, J. M. Dent, Londres, 1981.

a una aeronave 747, no significa un gran aumento del contenido o la complejidad de la información, y es éste el punto que hago resaltar mediante la analogía.

Un ejemplo de la saltación DC-8 sería el siguiente. Supongamos que el cuello de una jirafa se hubiera alargado en tan sólo una etapa de mutación espectacular. El cuello del padre y de la madre tenía la longitud estándar del cuello de un antílope. Su monstruoso hijo nació con un cuello tan largo como el de la jirafa moderna, y todas las jirafas sucesivas han descendido del monstruo. No es probable que un caso semejante suceda en la Tierra, pero algo así podría darse en otro lugar del universo. En principio, no hay ninguna objeción contra esta posibilidad, en el sentido que sí la hay y muy profunda contra la idea (747) de que un órgano tan complejo como el ojo pudiera brotar en la carne desnuda mediante una sola mutación. La diferencia crucial consiste en la complejidad.

Pienso que el cambio de cuello corto de antílope a cuello largo de jirafa *no* es un incremento de la complejidad. Ciertamente, ambos cuellos son estructuras extremadamente complejas. No sería posible pasar de *ningún* cuello a cualquiera de los dos tipos de cuello en un solo paso: significaría una saltación 747. Pero una vez que ya existe la compleja organización del cuello del antílope, el paso a un cuello de jirafa es solamente un alargamiento: varias cosas tendrían que crecer más rápidamente en alguna etapa del desarrollo embrionario; la complejidad existente se preserva. En la práctica, claro está, un cambio tan drástico de este tipo en la dimensión muy probablemente tendría repercusiones negativas que pondrían en entredicho la supervivencia del macromutante. Un corazón del tamaño del corazón de un antílope probablemente no podría bombear la sangre hasta la recién extendida cabeza de la nueva jirafa. Este tipo de objeciones prácticas a la evolución mediante la saltación DC-8 sólo pueden respaldar mi argumento a favor del gradualismo, pero todavía quiero plantear otro argumento diferente y más universal en contra de la saltación 747.

Se podría argüir que es imposible establecer la distinción entre la saltación 747 y la DC-8 en la práctica. Después de todo, las saltaciones DC-8, tales como el supuesto alargamiento del cuello de la jirafa, pueden parecer muy complejas: los miotomas, las vértebras, los nervios, los vasos sanguíneos, todos tienen que alargarse conjuntamente. ¿No se trata de una saltación 747 que, por lo tanto, queda descartada? Pero, aunque este tipo de “coadaptación” con frecuencia se ha pensado como un problema en cualquier teoría evolutiva, y no sólo en las macromutacionales,³⁴ sólo ocurre cuando es deficiente nuestra idea de los mecanismos del

³⁴ Para una historia del tema, véase M. Ridley, “Coadaptation and the Inadequacy of Natural Selection”, *British Journal for the History of Science*, 15: 45-68, 1982.

desarrollo. Sabemos que las mutaciones individuales pueden orquestar cambios en las tasas de crecimiento de muchas y diversas partes de los órganos y, si pensamos en los procesos del desarrollo, no es sorprendente que así sea. Cuando una sola mutación causa, en una *Drosophila*, el crecimiento de una pata en el sitio donde debería haber una antena, esa pata se desarrolla con toda su formidable complejidad. Pero tal cosa no es ni misteriosa ni sorprendente, y tampoco una saltación 747, puesto que la organización de una pierna ya se halla presente en el cuerpo antes de la mutación. Dondequiera que veamos, como en la embriogénesis, un árbol ramificado de relaciones causales, cualquier pequeña alteración en un nodo principal del árbol puede tener grandes y complejos efectos ramificados que llegan hasta las puntas de las hojas. Pero aunque el cambio puede ser grande, no pueden darse incrementos grandes y repentinos en la información adaptativa. Si se piensa haber encontrado en la práctica un ejemplo particular de un incremento grande y repentino en la información adaptativamente compleja, uno puede estar seguro de que la información adaptativa ya se encontraba allí, incluso si fuera un rasgo atávico que se remontara a un ancestro primitivo.

Por lo tanto no hay ninguna objeción que se le pueda hacer en principio a las teorías de la evolución por saltos, incluida la teoría de los posibles monstruos,³⁵ siempre que se trate de una saltación DC-8 y no de una saltación 747. Gould³⁶ estaría de acuerdo: “Yo veo como ilegítimas todas las formas de la macromutación que incluyen *ab initio* el repentino origen de una nueva especie con todas sus diversas adaptaciones intactas”. Ningún biólogo culto realmente cree en la saltación 747, pero no todos han sido lo suficientemente explícitos sobre la distinción entre la saltación DC-8 y la saltación 747. Una consecuencia infortunada del hecho es que los creacionistas y los periodistas que los respaldan han podido explotar las afirmaciones aparentemente saltacionistas de algunos biólogos respetables. Aca-so el sentido de sus afirmaciones pudo haberse relacionado con lo que llamo la saltación DC-8, o incluso la puntuación no saltacionista; pero el creacionista *asume* la saltación en el sentido que califico de 747 y, en efecto, la saltación 747 sería un milagro divino.

Yo me pregunto también si no se le está haciendo una injusticia a Darwin, derivada de esta misma incapacidad de lidiar con la distinción entre las saltaciones DC-8 y 747. Con frecuencia se alega que Darwin se había identificado totalmente con el gradualismo y, por lo tanto, que si se demuestra la existencia de

³⁵ R. Goldschmidt, *The Material Basis of Evolution*, Yale University Press, New Haven, 1940.

³⁶ S. J. Gould, “The Meaning of Punctuated Equilibrium and its Role in Validating a Hierarchical Approach to Macroevolution”, *op. cit.*

alguna forma de evolución por saltos, se demostrará al mismo tiempo que Darwin estaba equivocado. Ésta es indudablemente la razón por la que se le ha dado tanta escandalosa publicidad a la teoría del equilibrio puntuado. ¿Pero se oponía en realidad Darwin a todos los saltos? ¿O tan sólo se oponía radicalmente, como yo sospecho, a la saltación 747?

Como ya hemos visto, el equilibrio puntuado nada tiene que ver con la saltación, pero en todo caso yo creo que no es evidente, como se alega frecuentemente, que a Darwin le hubieran incomodado las interpretaciones del registro fósil según el equilibrio puntuado. El siguiente pasaje, extraído de una de las últimas ediciones del *Origen*, se parece mucho a algo que pudiera haber aparecido en un reciente número de *Paleobiology*: “[...] los periodos durante los cuales las especies han estado experimentando modificaciones, aunque muy largos si se miden en años, probablemente han sido muy breves en comparación con los periodos durante los cuales estas mismas especies han permanecido intactas sin experimentar ningún cambio”.

A Gould³⁷ esto le parece intrascendente, una especie de anomalía que no se corresponde con las ideas principales de Darwin. Gould está en lo correcto al decir: “No se puede elaborar la historia citando selectivamente y buscando citas convenientes. El sentido general y el impacto histórico son los criterios adecuados. ¿Leyeron jamás a Darwin como un saltacionista sus contemporáneos o descendientes?” Ciertamente, nadie jamás acusó a Darwin de ser un saltacionista. Pero para la mayoría de la gente, la saltación equivale a la macromutación y, como subraya el mismo Gould: “El equilibrio puntuado no es una teoría de la macromutación”. Para mí lo más importante es que podemos alcanzar una mejor comprensión de la tendencia general gradualista de Darwin si recordamos la distinción entre la saltación 747 y la DC-8.

Acaso parte del problema sea que el mismo Darwin jamás hizo esta distinción. En algunos pasajes antisaltacionistas parecería que piensa en la saltación DC-8. Pero en tales ocasiones no se muestra fuertemente opuesto al respecto: en una carta de 1860 dice: “En cuanto a los saltos repentinos, no tengo ninguna objeción —en algunos casos me ayudarían—. Sólo puedo decir que estudié el asunto y que no encontré prueba alguna que me hiciera creer en los saltos [como fuentes de nuevas especies], pero sí encontré muchas pruebas que apuntaban en la dirección opuesta”.³⁸ Esto no parece ser el pronunciamiento de un hombre fer-

³⁷ *Ibid.*

³⁸ Citado por N. C. Gillespie, *Charles Darwin and the Problems of Creation*, The University of Chicago Press, Chicago, 1979.

vorosamente opuesto, en principio, a los saltos repentinos. Y claro es que no hay razón alguna para que tuviera que oponerse fervorosamente a ellos, ya que sólo pensaba en las saltaciones DC-8.

Pero en otras ocasiones Darwin sí muestra su oposición fervorosa, y en esos casos, creo yo, él tiene en mente la saltación 747: “Es imposible imaginar que un golpe fortuito hubiera formado tantas coadaptaciones”.³⁹ Como dice el historiador Neal Gillespie:

Para Darwin, la doctrina de los engendros monstruosos, respaldada por Chambers, Owen, Argyll, Mivart y otros, con base tanto en motivos claramente teológicos como científicos, en cuanto explicación de cómo las nuevas especies, o incluso los taxones superiores, se desarrollaron, no era mejor que un milagro: “no toca ni explica el caso de la coadaptación de los seres orgánicos entre sí y con las condiciones físicas de su vida”. No era en absoluto una “explicación” y su valor científico no era mayor que el de la creación “a partir del polvo de la tierra”.⁴⁰

Como dice Ridley⁴¹ respecto a la “tradición religiosa de los pensadores idealistas [quienes] eran fieles a la explicación de que los dispositivos adaptativos complejos son obra de un diseño inteligente”: “La mayor concesión que a Darwin le podían otorgar era que el Diseñador jugaba con la generación de la diversidad, diseñando la variación”. La respuesta de Darwin fue: “Si yo estuviera convencido de que requería tales apéndices a la teoría de la selección natural, rechazaría la idea como basura [...] Yo no valoraría en nada la teoría de la selección natural si ésta requiriera añadiduras milagrosas en cualquiera de las etapas de la descendencia”.

Su hostil rechazo de la saltación monstruosa tiene sentido si suponemos que él se refería a la saltación 747 —la repentina invención de una nueva complejidad adaptativa—. Es muy probable que precisamente a eso se refiriera, porque eso era exactamente lo que muchos de sus oponentes tenían en mente. Los saltacionistas como el duque de Argyll (¡aunque presumiblemente no como Huxley!) querían creer en la saltación 747, sin duda porque su explicación sí exigía una intervención sobrenatural. Darwin, por la misma razón, no creía en su posibilidad. Para citar nuevamente a Gillespie:⁴² “Para Darwin, la evolución diseñada,

³⁹ Citado en M. Ridley, *op. cit.*

⁴⁰ N. C. Gillespie, *op. cit.*, p. 118.

⁴¹ M. Ridley, *op. cit.*

⁴² N. C. Gillespie, *op. cit.*, p. 120.

ya fuera que se manifestara en la saltación, en los engendros monstruosos, o en las variaciones manipuladas, no era más que una forma disimulada de la creación divina”.

Creo yo que este planteamiento nos proporciona la única lectura razonable del conocido comentario de Darwin: “Si fuera posible demostrar que existiera cualquier órgano complejo que no hubiera podido ser formado mediante numerosas, sucesivas, leves modificaciones, entonces mi teoría se derrumbaría totalmente”. No es ésta una invocación y defensa del gradualismo, tal como un paleontólogo moderno hoy utiliza el término. La teoría de Darwin es falsificable, ¡pero él era demasiado inteligente como para que su teoría fuera *tan* fácil de falsificar! ¿Por qué diablos se *hubiera* empeñado Darwin en elaborar una versión tan arbitrariamente restrictiva de la evolución, una versión tan expuesta a la falsificación? Para mí es claro que no lo hizo. Yo pienso que la prueba está en su utilización del término “complejo”. Gould⁴³ califica este pasaje de “claramente inválido”. Es inválido si la alternativa a las leves modificaciones se ve como la saltación DC-8. Pero si la alternativa se ve como la saltación 747, el comentario de Darwin es muy válido y muy sabio. A pesar de aquellos a quienes Miller⁴⁴ ha llamado no muy gentilmente los críticos más tontos de Darwin, su teoría es indudablemente falsificable, y en el pasaje citado él pone su dedo en una de las formas en que podría falsificarse.

Hay, pues, dos tipos imaginables de saltación: la DC-8 y la 747. La primera es perfectamente posible; sin duda se da en el laboratorio y en la granja, y pudo haber contribuido en forma importante a la evolución. La segunda, a menos que se acepte una intervención sobrenatural, queda descartada estadísticamente. En los tiempos de Darwin, los partidarios y oponentes de la saltación con frecuencia pensaban en la saltación 747 porque creían —o cuestionaban— la intervención divina. Darwin se oponía a la saltación (747) porque veía con razón a la selección natural como una *alternativa* a lo milagroso, en cuanto explicación de la complejidad adaptativa. Hoy la saltación significa ya sea la puntuación (que en ningún sentido equivale a la saltación) o la saltación DC-8, y Darwin no hubiera objetado en principio ninguna de las dos; acaso hubiera tenido dudas respecto a los datos. Por lo tanto, yo no pienso que en el contexto moderno se le deba etiquetar como un gradualista duro. Sospecho que en el contexto moderno él se mostraría muy abierto a todas las posibilidades.

⁴³ S. J. Gould, “The Meaning of Punctuated Equilibrium and its Role in Validating a Hierarchical Approach to Macroevolution”, *op. cit.*

⁴⁴ J. Miller, *Darwin for Beginners*, Writers & Readers, Londres, 1982.

Es en el sentido anti 747 que Darwin fue un apasionado gradualista, y es en este mismo sentido que todos nosotros debemos ser gradualistas, no sólo en relación con la vida en la Tierra, sino también con la vida en todo el universo. En este sentido el gradualismo es esencialmente un sinónimo de la evolución. El sentido en que podríamos ser no gradualistas es mucho menos radical, aunque también muy interesante. La teoría de la evolución por saltos ha sido aclamada en la televisión y en otros lugares como algo radical y revolucionario, como un cambio de paradigma. Sin duda una de sus interpretaciones es revolucionaria, pero esa interpretación (la versión de la macromutación 747) es ciertamente errónea, y aparentemente quienes la propusieron desde el origen ya no la defienden. El sentido en que la teoría pudiera ser correcta no es particularmente revolucionario. En este campo, uno puede elegir sus saltos a fin de ser revolucionario o a fin de estar en lo cierto, pero no puede hacer ambas cosas al mismo tiempo.

Teoría 5: La evolución aleatoria

Varias versiones de esta familia de teorías han estado en boga en diversos momentos. Los “mutacionistas” de principios del siglo xx —De Vries, W. Bateson y sus colegas— creían que la selección sólo servía para eliminar aberraciones perjudiciales y que la verdadera fuerza impulsora de la evolución era la de la mutación. A menos que uno crea que alguna misteriosa fuerza vital determine las mutaciones, resulta suficientemente obvio que uno sólo puede ser un mutacionista si se olvida de la complejidad adaptativa —¡se olvida, en otras palabras, de la mayoría de las consecuencias de la evolución que son de algún interés!—. Quede para los historiadores el inexplicable enigma de cómo pudo satisfacer a biólogos tan distinguidos como De Vries, W. Bateson y T. H. Morgan una teoría tan ridículamente inadecuada. No resulta suficiente decir que el punto de vista de De Vries estaba limitado por su interés exclusivo en la botánica de la prímula. Él sólo tenía que haber observado la complejidad adaptativa de su propio cuerpo para ver que el “mutacionismo” no sólo era una teoría errónea: era patentemente errónea desde el mismo inicio.

Aquellos mutacionistas posdarwinianos eran también saltacionistas y anti-gradualistas, y así los considera Mayr al exponer la teoría 5, pero el aspecto de sus ideas que yo quiero criticar aquí es más fundamental. Al parecer ellos realmente pensaban que la mutación, por sí misma y sin la selección, bastaba para explicar la evolución. No *podría* ser así en ningún planteamiento no místico de la muta-

ción, ya fuera gradualista o saltacionista. Si la mutación no está dirigida, obviamente no es capaz de explicar las adaptaciones dirigidas de la evolución. Si la mutación está dirigida de manera adaptativa, tenemos el derecho a preguntar cómo ocurre. El principio lamarckiano del uso y desuso a lo menos se esfuerza valientemente en explicar cómo podría estar dirigida la variación. Los “mutacionistas” ni siquiera parecieron ver que allí había un problema, posiblemente porque desvalorizaron la importancia de la adaptación —y no fueron los últimos en hacerlo—. Es casi dolorosa la ironía con que hoy tenemos que leer el rechazo de Darwin por parte de W. Bateson: “La transformación de las poblaciones masivas mediante pasos imperceptibles guiados por la selección es, como la mayoría de nosotros hoy lo vemos, tan inaplicable en relación con la realidad que sólo nos puede maravillar [...] la carencia de perspicacia de los partidarios de tal propuesta”.⁴⁵

En la actualidad algunos genetistas de poblaciones se describen a sí mismos como partidarios de la “evolución no darwiniana”. Creen que un número considerable de los remplazos de genes que ocurren en la evolución son sustituciones no adaptativas de alelos, cuyos efectos interrelacionados son irrelevantes.⁴⁶ Tal cosa bien podría ser cierta, si no en Israel (véase Nevo en este volumen),⁴⁷ acaso sí en algún lugar del universo. Pero obviamente la idea en nada puede contribuir a la solución del problema de la evolución de la complejidad adaptiva. Los partidarios modernos del neutralismo admiten que su teoría no puede explicar la adaptación, pero eso no les impide considerar que es interesante. Hay gente que se interesa en algunas cosas y hay gente que se interesa en otras.

La frase “deriva génica aleatoria” con frecuencia se asocia con el nombre de Sewall Wright, pero la concepción que éste tenía de la relación entre deriva aleatoria y la adaptación es mucho más sutil que las otras ideas que he mencionado.⁴⁸ Wright no pertenece a la quinta categoría de Mayr, puesto que ve la selección como la fuerza impulsora de la evolución adaptativa. La deriva aleatoria puede facilitar el trabajo de la selección, ayudándola a escapar de las condiciones biológicas locales,⁴⁹ pero sigue siendo la selección quien determina el incremento de la complejidad adaptativa.

⁴⁵ W. Bateson, *Problems of Genetics*, Yale University Press, New Haven, 1913; citado por E. Mayr, *op. cit.*

⁴⁶ M. Kimura, “Evolutionary Rate at the Molecular Level”, *Nature*, 217: 624-626, 1968.

⁴⁷ E. Nevo, “Population Genetics and Ecology: The Interface”, en D. S. Bendall (comp.), *op. cit.*, pp. 287-322.

⁴⁸ S. Wright, “Genie and Organismic Selection”, *Evolution*, 34: 825-843, 1980.

⁴⁹ R. Dawkins, *The Extended Phenotype*, *op. cit.*, p. 40.

Ciertos paleontólogos recientemente han conseguido resultados fascinantes al realizar simulaciones computacionales de las “filogenias aleatorias”.⁵⁰ Tales paseos aleatorios a través del tiempo evolutivo producen tendencias que se parecen increíblemente a las reales, y resulta alarmanamente fácil, y tentador, ver tendencias aparentemente adaptativas en las filogenias aleatorias, tendencias que, sin embargo, no existen. Pero esto no significa que podamos admitir el desplazamiento aleatorio como una explicación de las tendencias adaptativas reales. Lo que sí podría significar es que algunos de nosotros hemos sido demasiado simplistas e ingenuos en relación con lo que creemos que son las tendencias adaptativas. Esto no cambia el hecho de que existan algunas tendencias que realmente *son* adaptativas —aunque no siempre las identifiquemos correctamente en la práctica— y de que esas tendencias adaptativas reales no puedan producirse por la deriva aleatoria. Alguna fuerza no aleatoria, presumiblemente la selección, las tiene que producir.

Así llegamos, finalmente, a la sexta de las teorías de la evolución en la lista de Mayr.

*Teoría 6: La dirección (el orden) que la selección
natural impone en la variación aleatoria*

El darwinismo —la selección no aleatoria de entes aleatoriamente variados que se replican gracias a sus efectos “fenotípicos”— es la única fuerza que conozco que pueda, en principio, guiar a la evolución hacia la complejidad adaptativa. El darwinismo funciona en este planeta. No padece de ninguna de las desventajas y debilidades que afectan a los otros cinco tipos de teorías, y no hay razones para dudar de su eficacia en el universo entero.

Los ingredientes de una receta general para la evolución darwiniana son los entes de algún tipo que pueden replicarse, ejerciendo algún tipo de “poder” fenotípico para lograrlo. He llamado “replicadores activos de tipo germinal” u *optimons* a estos entes necesarios.⁵¹ Es importante separar conceptualmente su replicación de sus efectos fenotípicos, a pesar de que en algunos planetas en la práctica se puedan conjugar. Las adaptaciones fenotípicas pueden verse como herramientas de la propagación del replicador.

⁵⁰ Véase, por ejemplo, D. M. Raup, “Stochastic Models in Evolutionary Palaeontology”, en A. Hallam (comp.), *Patterns of Evolution*, Elsevier, Ámsterdam, 1977, pp. 59-78.

⁵¹ R. Dawkins, *The Extended Phenotype*, op. cit., capítulo 5.

Gould⁵² ridiculiza la idea de la evolución basada en los replicadores, diciendo que se limita a la “contabilidad”. La metáfora es superficialmente adecuada: resulta fácil ver los cambios genéticos que acompañan a la evolución como datos contables, los simples registros, anotados por un tenedor de libros, de los sucesos fenotípicos realmente interesantes que tienen lugar en el mundo real. Una reflexión más profunda, sin embargo, muestra que la verdad es casi exactamente lo contrario. Una cuestión central en la evolución darwiniana (a diferencia de la lamarckiana) es que tiene que haber flechas causales que fluyen desde los genotipos hasta los fenotipos, pero no en sentido contrario. Los cambios en las frecuencias de los genes no equivalen a registros contables pasivos de los cambios fenotípicos: es precisamente porque (y en la medida que) causan activamente cambios fenotípicos que la evolución del genotipo puede ocurrir. Surgen graves errores de la incomprensión de la importancia de este flujo unidireccional,⁵³ y de su sobreinterpretación como un “determinismo genético” inflexible y uniforme.⁵⁴

La perspectiva universal me lleva a subrayar la distinción entre lo que se podría llamar la “selección aislada” y la “selección acumulativa”. El orden en el mundo no viviente puede resultar de procesos que se pueden describir como un tipo rudimentario de selección. Las olas del mar acomodan las piedritas en una playa, terminando por colocar las más grandes en capas separadas de las capas de las más pequeñas. Esto lo podemos ver como un ejemplo de la selección de una configuración estable a partir de un desorden inicialmente más aleatorio. Lo mismo se puede decir de las órbitas “armónicas” de los planetas en torno a las estrellas, de los electrones en torno a los núcleos, así como de las configuraciones de los cristales, las burbujas y las gotas, y acaso, también, del carácter dimensional del universo en que nos encontramos.⁵⁵ Pero todo lo anterior es un tipo de selección aislada. No da origen a la evolución progresiva porque no tienen lugar una replicación, una sucesión generacional. La adaptación compleja requiere muchas generaciones de selección acumulativa; el cambio en cada generación se construye sobre la base de lo que ha tenido lugar anteriormente. En la selección aislada se desarrolla un estado estable que luego se mantiene. No se multiplica, no genera vástagos.

⁵² S. J. Gould, “Irrelevance, Submission, and Partnership: The Changing Role of Paleontology in Darwin’s Three Centennials and a Modest Proposal for Macroevolution”, en D. J. Bendall (comp.), *op. cit.*, pp. 347-366.

⁵³ R. Dawkins, *The Extended Phenotype*, *op. cit.*, capítulo 2.

⁵⁴ *Ibid.*

⁵⁵ P. W. Atkins, *The Creation*, W. H. Freeman, Oxford, 1981.

En la vida, la selección que se desarrolla en *cualquier generación individual* es una selección aislada, análoga al ordenamiento de las piedritas en una playa. La característica peculiar de la vida es que en las sucesivas generaciones aquella selección construye, progresiva y acumulativamente, estructuras que a la larga se vuelven tan complejas como para sugerir la ilusión del diseño. La selección aislada es un lugar común de la física y no puede dar origen a la complejidad adaptativa. La selección acumulativa es el umbral y el sello distintivo de la biología y es también, creo yo, la fuerza que subyace en toda la complejidad adaptativa.

OTROS TEMAS PARA UNA CIENCIA FUTURA DEL DARWINISMO UNIVERSAL

Así, los replicadores activos germinales, junto con sus consecuencias fenotípicas, constituyen la receta general para la vida, pero la forma del sistema puede variar mucho de planeta en planeta, tanto en relación con los entes replicadores mismos como con la manera “fenotípica” mediante la cual éstos aseguran su supervivencia. De hecho, acaso no sea determinante la distinción entre “genotipo” y “fenotipo” (L. Orgel, comunicado personal). Los entes replicadores no tienen que ser el ADN o el ARN. No tienen que ser en absoluto moléculas orgánicas. Incluso en este planeta es posible que el ADN mismo sea un usurpador tardío del papel de la replicación que haya tomado el lugar de un anterior replicador cristalino inorgánico.⁵⁶ También es posible que la selección hoy opere en diversos niveles, por ejemplo los niveles del gen y de la especie o linaje y, acaso, el nivel de alguna unidad de transmisión cultural.⁵⁷

Una ciencia completa del darwinismo universal podría estudiar los aspectos de los replicadores que van más allá de su naturaleza precisa y del periodo temporal durante el cual se replican. Por ejemplo, el grado en que se “particularizan”, en vez de “mezclarse”, probablemente tiene una importancia mayor en la evolución que su precisa naturaleza física o molecular. Similarmente, una clasificación universal de los replicadores podría relacionarse más con su carácter dimensional y con sus principios codificadores que con su tamaño y estructura. El ADN es un ordenamiento unidimensional digitalmente codificado. Es concebible un código “genético” en la forma de una matriz bidimensional. Incluso, sería posible un código tridimensional, aunque los estudiantes del darwinismo universal pro-

⁵⁶ A. G. Cairns-Smith, *Genetic Takeover*, Cambridge University Press, Cambridge, 1982.

⁵⁷ R. C. Lewontin, “The Units of Selection”, *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1: 1-18, 1970.

bablemente se preguntarían cómo se podría “leer” semejante código. (El ADN es una molécula cuya estructura tridimensional determina la forma en que se replica y transcribe, pero esto no significa que sea un código tridimensional. El lenguaje del ADN depende del ordenamiento secuencial unidimensional de sus símbolos, no de su posición tridimensional en relación con los otros en la célula.) También es posible que haya problemas teóricos con los códigos analógicos —a diferencia de los digitales—, que sean similares a los problemas teóricos que podrían surgir de la condición de un sistema nervioso puramente analógico.⁵⁸

En cuanto a los recursos fenotípicos de poder mediante los cuales los replicadores influyen en su supervivencia, estamos tan acostumbrados a la idea de que forman organismos independientes o “vehículos”, que olvidamos la posibilidad de un fenotipo extracorporal o “extendido” más difuso. Incluso en esta Tierra, una gran cantidad de adaptaciones interesantes puede interpretarse como parte de un fenotipo extendido.⁵⁹ Sin embargo, es posible plantear de manera teórica general la necesidad de una estructura corporal discreta, con su propio ciclo vital recurrente, como algo necesario en cualquier proceso evolutivo de complejidad adaptativa avanzada.⁶⁰ Este asunto podría tener un sitio en una explicación completa del darwinismo universal.

Otro tema que podría discutirse a fondo es el que denominaré la divergencia y la convergencia (o recombinación) de los linajes replicadores. En el caso del ADN terráqueo, la “convergencia” proviene de la actividad sexual y los procesos relacionados. El ADN “converge” dentro de la especie tras haber “divergido” muy poco antes. Pero hoy se propone que un tipo distinto de convergencia puede ocurrir entre linajes que originalmente divergieron hace muchísimo tiempo. Por ejemplo, hay pruebas de la transferencia de genes entre los peces y las bacterias.⁶¹ En otros planetas, los linajes replicadores podrían permitir muy diversos tipos de recombinación, en escalas temporales muy distintas. En la Tierra, los ríos de la filogenia son casi todos divergentes: si los principales afluentes alguna vez se reconectarán tras haberse dividido, sólo ocurre mediante minúsculos arroyuelos, como en el caso de los peces y las bacterias. Claro es que existe un rico delta anatómico de divergencias y convergencias por la recombinación sexual *dentro* de las especies, pero sólo dentro de las especies. Puede ser que haya planetas donde

⁵⁸ W. A. H. Rushton, “Peripheral Coding in the Nervous System”, en W. A. Rosenblith (comp.), *Sensory Communication*, MIT Press, Cambridge, 1961, pp. 169-181.

⁵⁹ R. Dawkins, *The Extended Phenotype*, *op. cit.*, capítulos 11, 12 y 13.

⁶⁰ *Ibid.*, capítulo 14.

⁶¹ F. Jacob, “Molecular Tinkering in Evolution”, en D. S. Bendall (comp.), *op. cit.*, pp. 131-144.

el sistema “genético” permita una más extensa interrelación en todos los niveles de la ramificada jerarquía, un enorme y muy fértil delta.

No he reflexionado suficientemente en los fantasiosos conceptos que aparecen en los párrafos anteriores, a fin de evaluar su verosimilitud. Lo que quiero dar a entender principalmente es que existe una restricción en todas las especulaciones sobre la vida en el universo. Si una forma de vida muestra complejidad adaptativa, es que posee un mecanismo evolutivo capaz de generar la complejidad adaptativa. A pesar de lo diferentes que puedan ser los mecanismos evolutivos, si no existe otra generalización que pueda hacerse respecto a la vida en todo el universo, yo apuesto a que ésta siempre será identificable como vida darwiniana. La ley darwiniana⁶² es acaso tan universal como las grandes leyes de la física.

BIBLIOGRAFÍA

- Asimov, I., *Extraterrestrial Civilizations*, Pan, Londres, 1979. [Versión en español: *Civilizaciones extraterrestres*, trad. de Victorino Pérez, Plaza & Janés, Barcelona, 1986.]
- Atkins, P. W., *The Creation*, W. H. Freeman, Oxford, 1981. [Versión en español: *La creación*, trad. de Pedro Acordagiocoechea Goicoechea, Salvat, Barcelona, 1986.]
- Bateson, P. P. G., “Rules for Changing the Rules”, en D. S. Bendall, *Evolution from Molecules to Men*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983, pp. 483-508.
- , “Specificity and the Origins of Behavior”, *Advances in the Study of Behavior*, 6: 1-20, 1976.
- Bateson, W., *Problems of Genetics*, Yale University Press, New Haven, 1913.
- Billingham, J., *Life in the Universe*, MIT Press, Cambridge, 1981.
- Burnet, F. M., *Cellular Immunology*, Melbourne University Press, Melbourne, 1969. [Versión en español: *Inmunología*, Prensa Científica, Barcelona, 1984.]
- Cairns-Smith, A. G., *Genetic Takeover*, Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
- Crick, F., *Life Itself*, McDonald, Londres, 1982 [Versión en español: *La vida misma. Su origen y naturaleza*, trad. de P. Torres Aguilar, FCE, México, 1985.]
- Danchin, A., “Thèmes de la biologie: Théories instructives et théories sélectives”, *Revue des Questions Scientifiques*, 156: 151-164, 1979.
- Darwin, C., *The Origin of Species*, Penguin, Londres, 1968. [Versión en español: *El origen de las especies por medio de la selección natural*, CSIC-AMC-UNAM-Los Libros de la Catarata, Madrid, 2009.]

⁶² S. Eigen, “Self-replication and Molecular Evolution”, en D. S. Bendall (comp.), *op. cit.*, pp. 105-130.

- Dawkins, M. S., *Animal Suffering: The Science of Animal Welfare*, Chapman & Hall, Londres, 1980.
- Dawkins, R., *The Extended Phenotype*, W. H. Freeman, Oxford, 1982.
- , “The Necessity of Darwinism”, *New Science*, 94: 130-132, 1982.
- Eigen, S., “Self-replication and Molecular Evolution”, en D. S. Bendall (comp.), *Evolution from Molecules to Men*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983, pp. 105-130.
- Eldredge, N., y S. J. Gould, “Punctuated Equilibria: An Alternative to Phyletic Gradualism”, en T. J. M. Schopf (comp.), *Models in Paleobiology*, Freeman, Cooper & Co., San Francisco, 1972, pp. 82-115.
- Fisher, R. A., *The Genetical Theory of Natural Selection*, Dover, Nueva York, 1958.
- Gillespie, N. C., *Charles Darwin and the Problems of Creation*, The University of Chicago Press, Chicago, 1979.
- Goldschmidt, R., *The Material Basis of Evolution*, Yale University Press, New Haven, 1940.
- Gould, S. J., “Irrelevance, Submission, and Partnership: The Changing Role of Paleontology in Darwin’s Three Centennials and a Modest Proposal for Macroevolution”, en D. J. Bendall, *Evolution from Molecules to Men*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983, pp. 347-366.
- , “The Meaning of Punctuates Equilibrium and its Role in Validating a Hierarchical Approach to Macroevolution”, en R. Milkman (comp.), *Perspectives on Evolution*, Sinauer, Sunderland, 1982, pp. 83-102.
- , *The Panda’s Thumb*, W. W. Norton, Nueva York, 1980. [Versión en español: *El pulgar del panda*, Crítica, Madrid, 2006.]
- Ho, M. W., y P. T. Saunders, “Adaptation and Natural Selection: Mechanism and Teleology”, en C. M. Barker, L. Birke, A. D. Muir y S. P. R. Rose (comps.), *Towards a Liberatory Biology*, Allison & Busby, Londres, 1981, pp. 85-102.
- Hoyle, F., y N. C. Wickramasinghe, *Evolution from Space*, J. M. Dent, Londres, 1981. [Versión en español: *La evolución de la vida desde el espacio exterior*, trad. de Agustín Bárcena, FCE-Conacyt, México, 1992.]
- Jacob, F., “Molecular Tinkering in Evolution”, en D. S. Bendall (comp.), *Evolution from Molecules to Men*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983, pp. 131-144.
- Kimura, M., “Evolutionary Rate at the Molecular Level”, *Nature*, 217: 624-626, 1968.
- Koestler, A., *The Ghost in the Machine*, Hutchinson, Londres, 1967.
- Lewin, R., “Evolutionary Theory under Fire”, *Science*, 210: 883-887, 1980.
- Lewontin, R. C., “Gene, Organism and the Environment”, en D. S. Bendall (comp.), *Evolution from Molecules to Men*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983, pp. 273-286.
- , “Sociobiology as an Adaptationist Program”, *Behavioral Science*, 24: 5-14, 1983.

- Lewontin, R. C., "The Units of Selection", *Annual Review of Ecology and Systematics*, 1: 1-18, 1970.
- Lorenz, K., *Evolution and Modification of Behavior*, Methuen, Londres, 1966.
- Maynard Smith, J., "The Status of Neo-Darwinism", en C. H. Waddington (comp.), *Sketching Theoretical Biology: Toward a Theoretical Biology*, vol. II, Edinburgh University Press, Edimburgo, 1969, pp. 82-89.
- Mayr, E., *The Growth of Biological Thought*, Harvard University Press, Cambridge, 1982.
- Miller, J., *Darwin for Beginners*, Writers & Readers, Londres, 1982. [Versión en español: *Darwin para principiantes*, trad. de Paula Grosman, Era Naciente, Buenos Aires, 1995.]
- Nevo, E., "Population Genetics and Ecology: The Interface", en D. S. Bendall (comp.), *Evolution from Molecules to Men*, Cambridge University Press, Cambridge, 1983, pp. 287-322.
- Paley, W., *Natural Theology*, J. Vincent, Oxford, 1828.
- Pringle, J. W. S., "On the Parallel between Learning and Evolution", *Behaviour*, 3: 90-110, 1951.
- Raup, D. M., "Stochastic Models in Evolutionary Palaeontology", en A. Hallam (comp.), *Patterns of Evolution*, Elsevier, Ámsterdam, 1977, pp. 59-78.
- Ridley, M., "Coadaptation and the Inadequacy of Natural Selection", *British Journal for the History of Science*, 15: 45-68, 1982.
- Rushton, W. A. H., "Peripheral Coding in the Nervous System", en W. A. Rosenblith (comp.), *Sensory Communication*, MIT Press, Cambridge, 1961, pp. 169-181.
- Stanley, S., *The New Evolutionary Timetable*, Basic Books, Nueva York, 1981. [Versión en español: *El nuevo cómputo de la evolución: fósiles, genes y origen de las especies*, trad. de C. López Fanjul, Siglo XXI, México, 1986.]
- Stebbins, G. L., *Darwin to DNA, Molecules to Humanity*, W. H. Freeman, San Francisco, 1982.
- Steele, E. J., *Somatic Selection and Adaptive Evolution*, Williams & Wallace, Toronto, 1979.
- Thorpe, W. H., *Learning and Instinct in Animals*, Methuen, Londres, 1963.
- Turner, J. R., "Review of R. J. Berry, Neo-Darwinism", *New Scientist*, 94: 160-162, 1982.
- Wright, S., "Genie and Organismic Selection", *Evolution*, 34: 825-843, 1980.

Stuart A. Kauffman

XXX. ¿QUÉ ES LA VIDA?
¿TUVO RAZÓN SCHRÖDINGER?*

HACE MEDIO siglo, en Dublín, una figura principal de la ciencia de este siglo se aventuró en los dominios de una ciencia que no era la suya y predijo su futuro. El libro que resultó de esta incursión, *What is Life?*, tiene fama de haber inspirado a algunos de los pensadores más brillantes que jamás hayan existido a ingresar en la biología y entregarse a la labor que dio origen a la biología molecular.¹ El “pequeño libro” de Schrödinger no desmerece su brillante reputación. Pero, medio siglo después, y en esta ocasión en que se celebra y honra su aparición, acaso podamos atrevernos a hacer una nueva pregunta: ¿es correcta la tesis central de la obra? No pretendo desde luego deshonar a un pensador tan soberbio como Schrödinger lo fue, ni a los pensadores que se inspiraron directamente en él, sugiriendo que él pudo haberse equivocado o, por lo menos, que no completó cabalmente su tesis. Más bien, al igual que todos los científicos que se han inspirado en sus ideas, yo también quiero continuar la búsqueda.

Vacilo incluso en plantear las preguntas que habré de hacer, puesto que sé muy bien hasta qué punto las respuestas del propio Schrödinger forman parte de nuestra idea de la vida a partir de Darwin y Weissman, y a partir del desarrollo de la teoría del plasma germinal, donde el gen es la forma necesaria del almacenamiento estable de la variación hereditaria: “Orden a partir del orden”, fue la respuesta de Schrödinger. Los sólidos aperiódicos y el microcódigo que él propuso entonces se han convertido en el ADN y el código genético de hoy. Casi todos los biólogos están convencidos de que tales estructuras moleculares autorreplicadoras y tal microcódigo son esenciales para la vida.

Confieso que yo mismo no estoy totalmente convencido. El meollo del debate se centra en la cuestión de si la fuente del orden en la biología yace predomi-

* Este capítulo apareció originalmente en M. P. Murphy y L. A. J. O'Neill (comps.), *What is Life? The Next Fifty Years: Speculation on the Future of Biology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1997, pp. 83-114.

¹ E. Schrödinger, *What is Life? With “Mind and Matter” and Autobiographical Sketches*, Cambridge University Press, Cambridge, 1967.

nantemente en las estructuras de los enlazamientos estables de las moléculas —la principal alegación de Schrödinger— o en la dinámica colectiva de un sistema compuesto de tales moléculas. Schrödinger recalcó, correctamente, el papel crítico que jugaban la mecánica cuántica, la estabilidad molecular y la posibilidad de un microcódigo que dirigiera la ontogenia. A la inversa, sospecho que la fuente última de la autorreproducción, y el requisito de la estabilidad para la variación hereditaria, el desarrollo y la evolución, aunque requieren la estabilidad de las moléculas orgánicas, también pueden requerir propiedades ordenadas que surjan en el comportamiento colectivo de complejos sistemas reactivos químicos no equilibrados. Tales sistemas reactivos complejos, como habré de proponer, pueden atravesar espontáneamente un umbral, o fase de transición, más allá del cual muestran la capacidad colectiva de la autorreproducción, la evolución, y el comportamiento dinámico perfectamente ordenado. Las fuentes últimas del orden necesario para la emergencia de la vida y la evolución acaso se encuentren en nuevos principios de comportamiento colectivo emergente en sistemas reactivos lejos del equilibrio.

En dos palabras, y como antecedente de lo que sigue: si bien las ideas de Schrödinger sobre la vida actual no son erróneas, yo sospecho que también, en un sentido más profundo, no son exhaustivas. La formación de sólidos aperiódicos que porten un microcódigo, el orden a partir del orden, acaso no es ni necesario ni suficiente para la emergencia y la evolución de la vida. Pero ciertos tipos de dinámicas colectivas estables acaso son tan necesarias como suficientes para la vida. Quiero recalcar que no planteo estas cuestiones como conclusiones definitivas, sino como temas de discusión.

EL ARGUMENTO DE SCHRÖDINGER

Schrödinger inicia su exposición enfatizando la idea del orden macroscópico que tenía la mayoría de los científicos de su época y de épocas anteriores. Este orden, nos dice, consiste en promedios basados en conjuntos enormes de átomos o moléculas. La mecánica estadística es el marco intelectual apropiado para este análisis. La presión de un gas contenido en un volumen es solamente el comportamiento promedio de grandes cantidades de moléculas que impactan y rebotan en las paredes. El comportamiento ordenado es un promedio, y se deriva del comportamiento de las moléculas individuales.

¿Pero cómo se explica el orden en los organismos y, en particular, las raras

mutaciones y la variación hereditaria? Schrödinger utiliza los datos del momento para calcular el número de átomos que podrían involucrarse en un gen, y correctamente concluye que la cantidad no puede ser más de unos cuantos miles de átomos. El orden debido al promedio estadístico no puede ser de ayuda en este caso, alega Schrödinger, puesto que el número de átomos es demasiado pequeño como para determinar un comportamiento fiable. En los sistemas estadísticos, la dimensión esperada de las fluctuaciones es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del número de sucesos. Si se arroja una moneda al aire 10 veces, 80% de “águilas” no sería sorprendente; si se arroja 10 000 veces, 80% de “águilas” sería asombroso. Con un millón de sucesos, señala Schrödinger, las fluctuaciones estadísticas serían del orden de 0.001, lo cual resulta poco fiable en relación con el orden que existe en los organismos.

La mecánica cuántica, dice Schrödinger, acude al rescate de la vida. La mecánica cuántica determina una estructura molecular bien ordenada en los sólidos. El caso más sencillo es el de un cristal. Pero los cristales son estructuralmente monótonos. Los átomos se ordenan como un encaje invariable de tres dimensiones. Si se conoce la posición de los átomos en una “unidad de cristal” mínima, se puede conocer dónde se encuentran los demás átomos en todo el cristal. Esto sería en el mejor de los casos, desde luego, porque los cristales pueden tener defectos complejos, pero el punto queda claro. Los cristales poseen una estructura muy regular, de manera que las diferentes partes del cristal todas en cierto sentido nos “dicen” la misma cosa. Un momento después Schrödinger traduce la idea de “decir” como la idea de “codificar”. Con este salto, un cristal regular no puede codificar mucha información. Toda la información se encuentra en la célula/unidad.

Como los sólidos tienen el orden requerido, pero los sólidos periódicos como los cristales son demasiado regulares, Schrödinger apuesta por los sólidos aperiódicos. La sustancia del gen, para Schrödinger, debe ser alguna forma de cristal aperiódico.

La forma de la aperiodicidad debe contener algún tipo de código microscópico que, de algún modo, controle el desarrollo del organismo. El carácter cuántico del sólido aperiódico determinará que habrán de ocurrir pequeños cambios específicos, mutaciones. La selección natural, sobre la base de estos pequeños cambios específicos, habrá de seleccionar las mutaciones favorables, según la hipótesis de Darwin.

Schrödinger tenía razón. Su libro se merece la gran reputación que tiene. Diez decenios después ya conocemos la estructura del ADN. Sí existe, efectivamente, un código que pasa del ADN al ARN y a la estructura primaria de las proteí-

nas. Para cualquier científico el hecho hubiera significado un maravilloso logro, no digamos para un físico que se había saltado la barda del jardín de la biología.

¿Pero es la intuición de Schrödinger necesaria o suficiente? ¿Es necesario o suficiente el orden que existe en el cristal aperiódico del ADN para la evolución de la vida o para el orden dinámico que existe en la vida real? No es ni necesario ni suficiente, sospecho. Las fuentes últimas del orden acaso requieran el orden específico de enlaces químicos estables que se deriva de la mecánica cuántica, pero se encuentran en otro lugar. Las fuentes últimas del orden y la autorreproducción acaso están en la emergencia de una dinámica colectivamente ordenada en los sistemas reactivos químicos complejos.

La parte principal de este capítulo tiene dos secciones. En la primera se examina brevemente la posibilidad de que la emergencia de la vida misma no se basa en las propiedades de replicación de los patrones del ADN o el ARN, sino en una fase de transición a series de moléculas colectivamente autocatalíticas en los sistemas termodinámicos abiertos. En la segunda sección se examina la emergencia de un orden colectivamente dinámico en complejas redes de procesamiento paralelos de elementos. Estos elementos podrían ser genes cuyas actividades se regulan mutuamente, o podrían ser los polímeros catalizadores en una serie autocatalítica. Tales redes están abiertas termodinámicamente, y la fuente medular del orden dinámico que muestran se encuentra en la forma en que las trayectorias dinámicas convergen en pequeños atractores en el espacio de fases del sistema.

Puesto que yo quiero proponer que la convergencia en pequeños atractores en los sistemas termodinámicos abiertos es una fuente principal del orden en los organismos vivientes, quiero terminar esta parte introductoria exponiendo el fondo temático de la discusión de Schrödinger sobre las leyes estadísticas.

El punto central es sencillo: en los sistemas termodinámicos cerrados, no existe la convergencia en el espacio de fase apropiado. El carácter de las leyes estadísticas resultantes refleja esta carencia de convergencia. Pero en algunos sistemas termodinámicos abiertos puede haber una convergencia masiva del flujo dinámico del sistema en su espacio de estado. Esta convergencia puede engendrar el orden con la suficiente rapidez como para contrarrestar las fluctuaciones térmicas que siempre ocurren.

La distinción crítica entre un sistema cerrado en equilibrio y un sistema abierto lejos del equilibrio es ésta: en un sistema cerrado, no se descarta nada de información. El comportamiento del sistema es, al fin y al cabo, reversible. Por lo tanto, se conservan los volúmenes de las fases. En los sistemas abiertos, se descar-

ta la información en el medio ambiente y el comportamiento del subsistema implicado no es reversible. Por lo tanto, el volumen de fase del subsistema puede decrecer. Yo no soy un físico, pero intentaré exponer las cuestiones con sencillez y, espero, con corrección.

Pensemos en un gas, encerrado en una caja, que no puede intercambiar materia y energía con el entorno. Cualquier tipo de ordenamiento microscópico de moléculas de gas es tan posible como cualquier otro tipo. El movimiento de las moléculas de gas se gobierna por las leyes de Newton. Por tanto, los movimientos son microscópicamente reversibles, conservándose la energía total del sistema. Cuando las moléculas chocan entre sí, se intercambia energía, pero no se pierde. La “hipótesis ergódica”, una especie de salto de fe que funciona, asevera que cuando ocurren estas colisiones moleculares, el sistema en conjunto pasa por todos los posibles microestados a lo largo del tiempo con la misma frecuencia. Así, la probabilidad de que el sistema se encuentre en un macroestado es exactamente igual al número fraccionario de los microestados que corresponden a ese macroestado.

El teorema de Liouville afirma que los volúmenes en el espacio de fase se conservan bajo el flujo de un sistema en equilibrio. En un sistema con N moléculas de gas, la posición y momento de cada molécula en tres dimensiones espaciales puede representarse con seis números. Por lo tanto, en un espacio dimensional de $6N$ fases, el estado actual de todo el volumen de gas se puede representar como un punto. Pensemos en una serie de casi idénticos estados iniciales del gas encerrado en una caja. Los puntos correspondientes ocupan parte del volumen en el espacio de fase. El teorema de Liouville afirma que cuando ocurren las colisiones moleculares en cada copia de la caja de gas, el volumen correspondiente en el espacio de fase se mueve, se deforma y se extiende en el espacio de fase. Pero el volumen total en el espacio de fase permanece constante. No hay convergencia en el flujo del espacio de fase. Puesto que el volumen de fase es constante, entonces, según la hipótesis ergódica, las probabilidades de los macroestados son simplemente proporcionales al número relativo de los microestados dentro de cada macroestado, normalizado por el número total de microestados.

Supongamos, al contrario, que el flujo del sistema en el espacio de fase permitiera que el volumen de fase inicial se contrajera progresivamente hasta un solo punto o hasta un pequeño volumen. Entonces el comportamiento espontáneo del sistema fluiría hasta formar una configuración singular o un pequeño número de configuraciones. ¡Emergería el orden! Es evidente que semejante convergencia no

puede darse en un sistema termodinámico equilibrado cerrado. Si se diera, la entropía decrecería, en vez de aumentar, en el sistema entero.

Este tipo de orden puede emerger. Obviamente, la emergencia de este tipo de orden requiere como condición necesaria que el sistema esté termodinámicamente abierto al intercambio de materia y energía. Este intercambio permite que la información salga del subsistema involucrado y se pierda en el medio ambiente. Un físico diría que los “grados de libertad” —las diversas formas en que las moléculas pueden moverse e interactuar— se pierden en el baño térmico del medio ambiente.

Así, el tipo de orden dinámico que buscamos sólo puede aparecer en los sistemas termodinámicos no equilibrados. Ilya Prigogine ha denominado estructuras disipativas a tales sistemas. Hoy conocemos los ejemplos de los remolinos, las reacciones de Belousov-Zhabotinsky, las células Bénard, y demás; sin embargo, es necesario recalcar que el hecho de estar lejos del equilibrio termodinámico por sí mismo es tan sólo una condición necesaria, no una condición suficiente, para la emergencia de una dinámica muy ordenada. Muchas versiones de la mítica mariposa de Río de Janeiro cuyas alas generan el caos climatológico pueden reaparecer en los sistemas químicos no equilibrados complejos, generando un caos que impediría la emergencia y la evolución de la vida. En la tercera sección de este capítulo, yo retorno a la emergencia del comportamiento dinámico colectivamente ordenado en los sistemas abiertos no equilibrados.

EL ORIGEN DE LA VIDA COMO FASE DE TRANSICIÓN

Hoy conocemos el sólido aperiódico cuya existencia Schrödinger imaginó. Desde que Watson y Crick dijeron que la estructura de la plantilla complementaria de la doble hélice del ADN presagiaba su modo de replicación, casi todos los biólogos han adoptado alguna versión de la complementariedad de la plantilla como un requisito necesario para la emergencia de los sistemas moleculares autorreproductores. Las versiones preferidas hoy son las moléculas de ARN o algún polímero similar. Se espera que tales polímeros puedan actuar como plantillas para su propia replicación, en ausencia de cualquier catalizador externo.

Hasta la fecha, los intentos de lograr la replicación de las secuencias del ARN en ausencia de las enzimas han tenido muy limitado éxito. Leslie Orgel, uno de los ponentes en la conferencia del Trinity College, Dublín, y un químico orgánico

notable, se ha esforzado mucho en lograr tal replicación molecular.² Él podría explicar, mejor que yo, las dificultades de la empresa. Pero, en resumidas cuentas, son muchos los problemas. Es difícil lograr la síntesis abiótica de los nucleótidos. Los nucleótidos prefieren enlazarse mediante enlaces 2'-5', en vez de los enlaces 3'-5' requeridos. Se intenta encontrar una secuencia arbitraria de cuatro bases de ARN normales a fin de utilizarlas como una plantilla para alinear las cuatro bases complementarias mediante apareamientos de enlaces de hidrógeno, de manera que los nucleótidos alineados formen los enlaces 3'-5' requeridos y se desliguen de la plantilla inicial, y que el sistema realice nuevamente el ciclo para hacer un número exponencial de copias. Hasta la fecha esto no se ha logrado. Las dificultades surgen por motivos químicos. Por ejemplo, una hebra que sea más rica en C que en G puede formar la segunda hebra como se espera. Pero la segunda, más rica en G que en C, tiende a formar enlaces G-G que son la causa de que la molécula se doble de tal forma que impida su funcionamiento como una nueva plantilla.

Con el descubrimiento de las ribozimas y con la hipótesis de un mundo del ARN, una nueva y esperanzadora idea es que una molécula de ARN podría funcionar como una polimerasa capaz de copiarse a sí misma y a cualquier otra molécula de ARN. Jack Szostak de la Escuela de Medicina de Harvard se esfuerza en desarrollar tal polimerasa *de novo*. Si lo logra, será un *tour de force*. Pero yo no estoy convencido de que tal molécula represente la solución a la emergencia de la vida. Me parece una estructura demasiado rara como para haber sido aleatoriamente la primera "molécula viviente". Y, si se hubiera formado, yo no estoy seguro de que hubiera podido evolucionar. Tal molécula, al igual que cualquier enzima, cometería errores al replicarse, y por lo tanto haría copias mutantes. Éstas se completarían con la polimerasa de la ribozima "silvestre" a fin de replicar esa polimerasa, y estarían expuestas a más errores. En consecuencia, las polimerasas mutantes de ARN tenderían a generar secuencias aún más mutantes de polimerasas de ARN. Podría ocurrir una "catástrofe de errores" desenfrenada, del tipo que sugirió primero Orgel en relación con la codificación y la traducción. Yo no estoy seguro de que pudiera surgir tal catástrofe de errores, pero creo que vale la pena analizar el problema.

Cuando uno observa la belleza simétrica de la doble hélice del ADN o de una hélice similar de ARN, uno se ve obligado a admitir la singular belleza de la hipótesis correspondiente. Estas estructuras tuvieron que ser las primeras moléculas

² L. E. Orgel, "Evolution of the Genetic Apparatus: A Review", *Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology*, 52: 9-15, 1987.

vivientes. ¿Pero es verdad? ¿O será posible que las raíces de la vida sean más profundas? Seguidamente exploro esta posibilidad.

Los organismos de vida libre más sencillos son los micoplasmas. Estos microorganismos derivados de bacterias tienen algo así como 600 genes que codifican las proteínas mediante la maquinaria estándar. Los micoplasmas poseen membranas, pero no una pared celular bacteriana. Viven en ambientes muy ricos, por ejemplo, los pulmones de los borregos o de los hombres, donde se satisface su necesidad de una amplia variedad de moléculas pequeñas exógenas.

¿Por qué albergan los más sencillos entes de vida libre algo así como 600 tipos de polímeros y un metabolismo con unas 1 000 moléculas pequeñas? ¿Y cómo se reproduce, finalmente, el micoplasma? Examinemos primero la segunda cuestión, pues la respuesta es tan sencilla como vital. La célula micoplasma se reproduce a sí misma mediante una especie de autocatálisis colectiva. Ninguna especie molecular dentro de los micoplasmas se replica realmente. Es cosa que sabemos pero que tendemos a olvidar. El ADN del micoplasma se replica gracias a las acciones coordinadas de un grupo de enzimas celulares. A su vez, estas últimas se sintetizan mediante secuencias mensajeras estándar de ARN. Como todos sabemos, el código se traduce desde el ARN en la forma de proteínas sólo con la ayuda de proteínas codificadas —las aminoacil ARNt sintetasas, que cargan adecuadamente cada ARN de transferencia para su posterior ensamblaje como proteína por el ribosoma—. Las moléculas de la membrana de la célula se forman por la catálisis de los intermediarios metabólicos. Todos conocemos la historia. Ninguna molécula de micoplasma se replica a sí misma. El sistema en conjunto es colectivamente autocatalítico. Cada especie molecular se forma por la catálisis de algunas especies moleculares del sistema, o se introduce de manera exógena como “alimento”.

Si el micoplasma es colectivamente autocatalítico, también lo son todas las células de vida libre. En ninguna célula se replica a sí misma realmente una molécula. Entonces preguntemos por qué la complejidad mínima que se encuentra en las células de vida libre es de cerca de 600 polímeros/proteínas y unas 1000 moléculas pequeñas. No existe una respuesta a esto. Preguntemos por qué debería haber una complejidad mínima, si según la hipótesis estándar las secuencias de ARN de una sola hebra podrían servir como plantillas y ser capaces de replicarse sin otras enzimas. Pero en esta hipótesis no podría darse una respuesta profunda a la cuestión de por qué existe en todas las células de vida libre una complejidad mínima. Es la sencillez del gen replicador “desnudo” lo que hace atractiva para nosotros esta hipótesis tan conocida. Lo único que se puede responder es que las más

sencillas de las células de vida libre, 3 450 millones de años después, simplemente tienen la complejidad de los micoplasmas. No es una explicación profunda, es simplemente otra historia evolucionista con el título de “Así es”.

Ahora quiero presentar, en forma resumida, un trabajo realizado por mí en los últimos ocho años, tanto individualmente como con mis colaboradores.³ Por su parte y de manera independiente, Rossler, Eigen y Cohen propusieron ideas similares a las mías.⁴ El concepto central es que en los sistemas químicos reactivos suficientemente complejos se traspasa una diversidad crítica de especies moleculares. Más allá de tal diversidad, la posibilidad de que exista un subsistema colectivamente autocatalítico llega a 1.0.

Las ideas medulares son sencillas. Pensemos en un espacio de polímeros, incluidos monómeros, dímeros, trímeros y demás. En términos concretos, los polímeros podrían ser secuencias de ARN, péptidos u otros tipos de formas poliméricas. Posteriormente, no nos limitaremos a los polímeros y pasaremos a observar los sistemas de moléculas orgánicas.

Digamos que la longitud máxima del polímero que examinaremos será de aproximadamente M . Dejemos que M aumente. Contemos la cantidad de polímeros en el sistema, desde los monómeros hasta los polímeros de longitud M . Es obvio que el número de polímeros en el sistema es una función exponencial de M . Así, en relación con los 20 tipos de aminoácidos, la diversidad total de los polímeros con una longitud de hasta M es ligeramente mayor que 20^M . En las secuencias de ARN, la diversidad total es ligeramente mayor que 4^M .

Veamos ahora todas las reacciones de ligamiento y escisión entre la serie de polímeros con una longitud de hasta M . Obviamente, es posible hacer un polímero orientado, tal como una secuencia péptida o ARN, con base en las secuencias más pequeñas en $M - 1$ formas, puesto que cualquier enlace interno en el polímero de longitud M es un sitio donde los fragmentos más pequeños pueden ligarse. Así, en el sistema de polímeros con una longitud de hasta M , hay exponencial-

³ S. A. Kauffman, “Cellular Homeostasis, Epigenesis and Replication in Randomly Aggregated Macromolecular Systems”, *Journal of Cybernetics*, 1: 71, 1971; S. A. Kauffman, “Autocatalytic Sets of Proteins”, *Journal of Theoretical Biology*, 119: 1-24, 1986; S. A. Kauffman, *The Origin of Order: Self-organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, Nueva York, 1993; J. D. Farmer, S. A. Kauffman y N. H. Packard, “Autocatalytic Replication of Polymers”, *Physics*, 22D: 50-67, 1986; R. J. Bagley, *The Functional Self-organization of Autocatalytic Networks in a Model of the Evolution of Biogenesis*, tesis de doctorado, San Diego, 1991; R. J. Bagley, J. D. Farmer y W. Fontana, “Evolution of a Metabolism”, en C. G. Langton *et al.* (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 371-408.

⁴ O. Rossler, “A System-Theoretic Model of Biogenesis”, *Zeitschrift für Naturforschung A*, B266: 741, 1971; M. Eigen, “Self-organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules”, *Naturwissenschaften*, 58: 465-523, 1971; J. E. Cohen, “Threshold Phenomena in Random Structures”, *Discrete Applied Mathematics*, 19: 113-118, 1988.

mente muchos polímeros, pero hay aún más reacciones de ligamiento y escisión mediante las cuales estos polímeros pueden interconectarse. Efectivamente, al aumentar M la proporción de reacciones de ligamiento y escisión por polímero aumenta linealmente con el aumento de M .

Definamos una gráfica de las reacciones entre una serie de polímeros. Por lo general, podríamos pensar en las reacciones de un sustrato y un producto, reacciones de un sustrato y dos productos, reacciones de dos productos y un sustrato, y reacciones de dos sustratos y dos productos. Las reacciones de transpeptidación y transesterificación se encuentran entre las reacciones de dos sustratos y dos productos que las secuencias de ARN pueden experimentar. Una gráfica de reacciones consiste en una serie de sustratos y productos que pueden mostrarse como puntos o como nodos desperdigados en un espacio tridimensional. Además, cada reacción puede marcarse mediante una pequeña “caja de reacción” circular. Las flechas desde el o los sustratos llegan a la caja. Las flechas desde la caja llegan al o a los productos. Puesto que todas las reacciones en realidad son por lo menos ligeramente reversibles, la dirección de la flecha simplemente indica cuáles series de moléculas constituyen los sustratos y cuáles los productos, en una de las dos direcciones que las reacciones pueden seguir. La gráfica de las reacciones consiste en este conjunto de nodos, cajas y flechas. Muestra todas las posibles reacciones entre las moléculas del sistema.

La implicación arriba señalada respecto a la diversidad química combinatoria consiste en que al aumentar la diversidad de los polímeros en el sistema, aumenta la proporción de las reacciones respecto a las moléculas. Esto significa que aumenta la proporción de las flechas y las cajas en relación con los nodos. La gráfica de las reacciones se vuelve cada vez más densa, cada vez más interconectada con posibilidades de reacciones, al aumentar la diversidad de las moléculas en el sistema.

En un sistema de reacciones de este tipo, siempre sucede que algunas reacciones ocurren espontáneamente con cierta velocidad. Le pido al lector olvidar, por el momento, estas reacciones espontáneas a fin de enfocar la siguiente cuestión: *¿bajo qué condiciones emerge una serie de moléculas colectivamente autocatalíticas?* Yo pretendo mostrar que, ante una amplia variedad de hipótesis sobre el sistema, las series autocatalíticas emergen con la diversidad crítica.

Empiezo señalando las bien conocidas transiciones de fase en las gráficas aleatorias. Arrojemos 10 000 botones en el suelo y empecemos a conectar aleatoriamente pares de botones con hilo rojo. Este tipo de conjunto de botones e hilos es una gráfica aleatoria. Más formalmente, una gráfica aleatoria es una serie de

nodos conectados aleatoriamente con una serie de bordes. De vez en cuando alzamos un botón y vemos cuántos botones alzamos junto con éste. Tal serie de botones conectados se denomina componente en una gráfica aleatoria. Erdős y Rényi mostraron, hace decenios, que cuando la proporción de bordes a nodos pasa de 0.5, este tipo de sistemas experimenta una transición de fase.⁵ Cuando la proporción es más baja, cuando el número de bordes equivale a, digamos, 10% del número de nodos, cualquier nodo estará conectado directa o indirectamente a sólo unos cuantos otros nodos. Pero cuando la proporción de bordes a nodos es de 0.5, de repente todos los nodos se conectan como un solo componente gigante. De hecho, si el número de nodos fuera infinito, entonces, al pasar de 0.5 la proporción de bordes a nodos, la dimensión del componente más grande saltaría discontinuamente de ser muy pequeña a ser infinita. El sistema muestra una transición de fase de primer orden. Es sencillo lo que hay que entender: cuando los suficientes nodos se conectan, incluso aleatoriamente, se cristaliza virtualmente un componente gigantesco interconectado.

Ahora solamente necesitamos aplicar esta idea a nuestra gráfica de reacciones. Adelantándonos, enfocaremos ahora las reacciones catalizadas. Habremos de necesitar una teoría respecto a cuáles polímeros catalizan cuáles reacciones. A partir de una variedad de teorías, encontraremos una sencilla consecuencia: al aumentar la diversidad de las moléculas en el sistema, la proporción de las reacciones a las moléculas aumenta. Así, en casi cualquier modelo sobre cuáles polímeros catalizan cuáles reacciones, al llegar a cierta diversidad casi todos los polímeros catalizan por lo menos una reacción. Al llegar a esta diversidad crítica se cristaliza en el sistema un gigantesco componente de reacciones catalizadas conectadas. Si los polímeros que actúan como catalizadores son ellos mismos los productos de las reacciones catalizadas, el sistema se convertirá en un sistema colectivamente autocatalítico.

Pero este paso es fácil. Pensemos en un modelo sencillo, en realidad más que sencillo, que represente cuál polímero cataliza cuál reacción. Asumamos que cualquier polímero tiene una probabilidad determinada, digamos, una en 1 000 millones, de actuar como un catalizador en cualquier reacción aleatoriamente elegida. Ahora pensemos en nuestra gráfica de reacciones, enfocando el momento en que la diversidad de moléculas en el sistema es tal, que ocurren 1 000 millones de reacciones por cada molécula. Y figurémonos que estas moléculas son polímeros que podrían ellos mismos catalizar las reacciones entre los polímeros. Pero en-

⁵ P. Erdős y A. Rényi, "On the Evolution of Random Graphs", *Magyar Tud. Akad. Mat. Kutató Int. Közl.*, 5: 17-61, 1960.

tonces sólo se catalizaría una reacción por cada polímero. Se cristalizaría un componente gigantesco en todo el sistema. Y, si lo pensamos un poco, es obvio que el sistema casi seguramente contendría subsistemas colectivamente autocatalíticos. La autorreproducción habría emergido al producirse la diversidad crítica, por causa de una transición de fase en una gráfica de reacciones químicas.

La figura xxx.1 muestra una serie colectivamente autocatalítica de este tipo. El punto principal que hay que recalcar es la propiedad emergente casi inevitable de estos sistemas, así como su contumaz holismo. Con una diversidad menor, la gráfica resultante de reacciones muestra pocas reacciones catalizadas por las moléculas del sistema. No se presenta una serie autocatalítica. Al aumentar la diversidad, más reacciones se catalizan por las moléculas en el sistema. En algún momento del incremento de la diversidad, una red conectada de reacciones catalizadas aparece repentinamente. La red abarca los catalizadores mismos. De repente se alcanza un cierre catalítico. Un sistema “viviente” que se autorreproduce, por lo menos en el modelo del silicio, muestra de manera multitudinaria su existencia.

Además, esta cristalización requiere una diversidad crítica. Un sistema más sencillo simplemente no logra el cierre catalítico. Empezamos a ver la posibilidad de una teoría profunda sobre la diversidad mínima de las células de vida libre. Aquí no se trata de una historia de “Así es”: los sistemas más sencillos no logran alcanzar o sustentar el cierre autocatalítico.

La diversidad molecular total que se requiere para atravesar la transición de fase depende de dos factores principales: 1) la proporción de las reacciones respecto a las moléculas, y 2) la distribución de las probabilidades de que las moléculas en el sistema catalicen las reacciones entre las mismas moléculas. La proporción de las reacciones respecto a las moléculas depende de la complejidad de los tipos de reacciones permitidas. Por ejemplo, si sólo se consideran las reacciones de escisión y ligamiento entre las secuencias de péptidos o de ARN, entonces la proporción de las reacciones respecto a los polímeros aumenta linealmente con la longitud máxima, M , del polímero en el sistema. Esto es fácil de ver esquemáticamente, ya que es posible hacer $M - 1$ formas de un polímero con una longitud M . Al aumentar M la proporción de las reacciones respecto a los polímeros aumenta proporcionalmente. A la inversa, se podrían considerar las reacciones de transesterificación o transesterificación entre las secuencias de los péptidos o del ARN. En este caso, la proporción de las reacciones respecto a los polímeros aumentaría mucho más velozmente que de manera lineal. En consecuencia, la diversidad de las moléculas que se requiere para la emergencia de series autocatalíticas es mucho menor. En términos concretos, si la probabilidad de que un polí-

mero arbitrario catalizara una reacción arbitraria, fuera de una en 1 000 millones, entonces unos 18 000 tipos de moléculas serían suficientes para la emergencia de series autocatalíticas colectivas.

Los resultados que aquí discutimos son sólidos, en comparación con la idealización demasiado simplista de que cualquier polímero tiene la probabilidad real de ser capaz de funcionar como un catalizador en cualquier reacción. Un modelo alternativo⁶ considera que las secuencias de ARN pueden ser potencialmente las ribozimas sencillas, y supone que a fin de funcionar como una ligasa específica, una ribozima tendría que equiparar su plantilla con los tres nucleótidos 5' terminales de un sustrato y los tres nucleótidos 3' de un segundo sustrato. ¡Recientemente Von Kiederowski⁷ ha generado precisamente ese tipo de ligasas específicas, las cuales realmente forman series autocatalíticas! Un hexámero liga dos támeros que luego constituyen el hexámero. Más recientemente Von Kiederowski ha creado sistemas catalíticos cruzados que se reproducen colectivamente.⁸ En línea con los resultados de Von Kiederowski, en nuestro modelo de sistema de ARN, a fin de abarcar el hecho de que otros aspectos que van más allá de la copia de la plantilla pueden ser necesarios para que el ADN candidato realmente funcione como un catalizador en la reacción, Bagley y yo asumimos que cualquier candidato copiado de este tipo sólo tendría una posibilidad en un millón de ser capaz de funcionar como una ligasa específica. Las series colectivamente catalíticas continúan emergiendo al llegar a una diversidad crítica de los modelos de secuencias de ARN en el sistema. Presumiblemente, los resultados son sólidos y seguirán siendo válidos en una amplia variedad de modelos sobre la distribución de las capacidades catalíticas entre series de polímeros o de otras moléculas orgánicas. En breve regresaré a la discusión de las vías experimentales para intentar crear tales sistemas colectivamente autocatalíticos.

Si esta idea es correcta, entonces la emergencia de la vida no depende de las bellas propiedades de copiado del ADN, el ARN u otros polímeros similares. En vez de eso, las raíces de la vida se encuentran en la catálisis misma y en las propiedades combinatorias de la química. Si esta idea es correcta, entonces las vías hacia la vida podrían ser amplios bulevares de probabilidad, no oscuras callejuelas de rara posibilidad.

¿Pero pueden evolucionar tales sistemas colectivamente autocatalíticos? ¿Pue-

⁶ S. A. Kauffman, *The Origins of Order*, op. cit.

⁷ G. von Kiederowski, "A Self-replicating Hexadesoxynucleotide", *Angewandte Chemie International Edition in English*, 25: 932-935, 1986.

⁸ Comunicación personal, 1994.

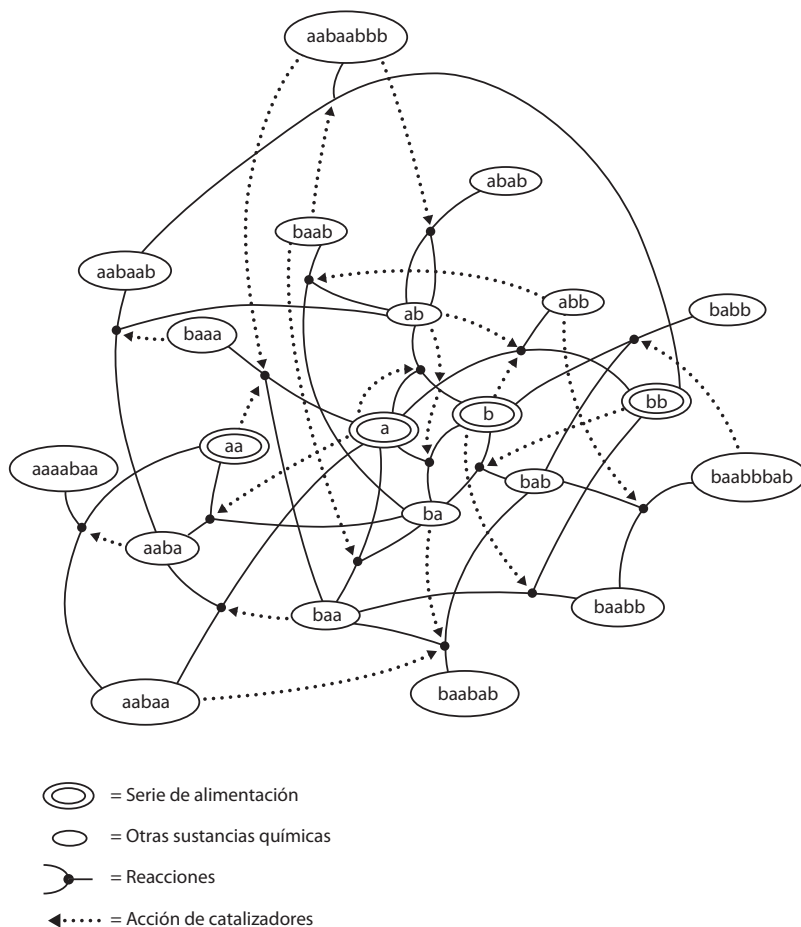


FIGURA XXX.1. Ejemplo típico de una serie autocatalítica pequeña.

Las reacciones se presentan con flechas que conectan los productos de escisión con el correspondiente polímero ligado más grande. Las líneas punteadas indican catalizadores y apuntan desde los catalizadores hasta la reacción que se cataliza. Los monómeros y dímeros de a y b constituyen la serie de alimentación mantenida (elipses dobles).

den evolucionar sin un genoma, en el sentido conocido? Y si es así, ¿cuáles son las implicaciones en nuestra tradición, en nuestro saber desde Darwin, Weismann y, también, Schrödinger? Porque si los sistemas autorreproductores pueden evolucionar sin un contenedor molecular grande y estable de información genética, entonces la idea de Schrödinger sobre los sólidos aperiódicos grandes no es necesaria para la emergencia y la evolución de la vida.

Por lo menos en los experimentos computacionales, tales sistemas colectivamente autocatalíticos pueden evolucionar sin un genoma. Primero, quiero recalcar que mis colaboradores, Farmer y Packard, y yo hemos demostrado, utilizando condiciones termodinámicas bastante realistas en modelos de flujo en reactores de tanque agitado, que efectivamente pueden surgir sistemas autocatalíticos modelo. Además, Bagley ha demostrado, como parte de su tesis, que tales sistemas pueden lograr y sustentar altas concentraciones de grandes polímeros modelo en un medio acuoso ante una tendencia hacia la escisión. Por añadidura, tales sistemas pueden “sobrevivir” si el medio ambiente “alimenticio” se modifica de alguna manera, pero “mueren” —es decir, se colapsan— si otros alimentos se eliminan del sistema del reactor de flujo. Sin embargo, los resultados acaso más interesantes muestran que tales sistemas pueden evolucionar hasta cierto punto sin un genoma. Bagley utilizó el razonable concepto de que las reacciones espontáneas que persisten en una serie autocatalítica tienden a dar origen a moléculas que no son miembros de la serie misma.⁹ Estas nuevas moléculas forman una especie de penumbra de especies moleculares en torno a la serie autocatalítica, y se presentan en concentraciones mayores que las que de otro modo formarían, debido a la presencia de la serie autocatalítica. La serie autocatalítica puede evolucionar injertando en sí misma algunas de estas nuevas especies moleculares. Es suficiente si una o más de estas moléculas nuevas fluctúan hasta una concentración modesta, y que entonces estas moléculas ayuden a los catalizadores de la serie autocatalítica formados por ellas mismas. Si así resulta, entonces la serie se expande a fin de incluir a estas nuevas especies moleculares. Presumiblemente, si algunas moléculas pueden inhibir las reacciones catalizadas por otras moléculas, la adición de nuevos tipos de moléculas a veces produce la eliminación de los tipos de moléculas más viejos.

En resumen, por lo menos *in silico* las series autocatalíticas pueden evolucionar sin un genoma. Ninguna estructura molecular grande estable porta información genética en un sentido usual. Más bien, la serie de moléculas y las reacciones que éstas experimentan y catalizan constituyen el “genoma” del sistema. El comportamiento dinámico estable de este sistema de reacciones autorreproductor, constituye la fundamental heredabilidad que muestra. La capacidad para incorporar especies moleculares nuevas, y acaso eliminar formas moleculares más viejas, constituye la capacidad de variación heredable. Y Darwin dice que tales sistemas evolucionarán mediante la selección natural.

⁹ R. J. Bagley, J. D. Farmer y W. Fontana, *op. cit.*

Si estas consideraciones son correctas, entonces pienso que el requisito planteado por Schrödinger de un sólido aperiódico grande como portador estable de la información heredable no es necesario para la emergencia de la vida o para su evolución. El orden a partir del orden, en este sentido, acaso no sea necesario.

Finalmente, yo quisiera comentar de manera breve algunos proyectos experimentales sobre estas cuestiones. La tesis fundamental es ésta: si se conjuntaran en un volumen suficientemente pequeño, bajo condiciones adecuadas, una diversidad lo suficientemente grande de polímeros, junto con las pequeñas moléculas de que están compuestos, y además algunas otras fuentes de energía química, ¿emergirían series colectivamente autocatalíticas? Estos nuevos proyectos experimentales se basan en las nuevas posibilidades genéticas moleculares. Hoy ya es posible clonar secuencias esencialmente aleatorias de ADN, de ARN y de péptidos para crear variedades extremadamente extensas de estos biopolímeros.¹⁰ Actualmente se exploran bibliotecas con variedades de hasta tres trillones de secuencias. Así, por vez primera es posible considerar la creación de sistemas de reacción con esta alta diversidad molecular en pequeños volúmenes que permitan las rápidas interacciones. Por ejemplo, tales polímeros podrían confinarse no sólo en reactores de tanque agitado de flujo continuo, sino en vesículas como los liposomas, las micelas y otras estructuras que proporcionan superficies y una frontera entre un hábitat interno y un hábitat externo. En vista de las series colectivamente autocatalíticas de Von Kiederowski, diseñadas gracias a su talento de químico,¹¹ sabemos que es posible construir *de novo* tales series colectivamente autocatalíticas. La teoría de la fase de transición que yo he esbozado aquí sugiere que los sistemas suficientemente complejos de polímeros catalíticos deberían “cristalizar” redes de reacciones conectadas, colectivamente autocatalíticas, como una propiedad emergente y espontánea, sin el diseño inteligente de la estructura de la red por parte de un químico.

La emergencia de la autocatálisis colectiva depende de lo fácil que pueda ser generar polímeros capaces de funcionar como sustratos y también como catalizadores. Esto no tendría que ser extremadamente difícil. La existencia de la au-

¹⁰ M. Ballivet y S. A. Kauffman, *Process for Obtaining DNA, RNA, Peptides, Polypeptides or Proteins by Recombinant DNA Techniques*, 1985 (la patente internacional del proceso se otorgó en Francia en 1987, en Gran Bretaña en 1989 y en Alemania en 1990); J. J. Devlin, L. C. Panganiban y P. A. Devlin, “Random Peptide Libraries: A Source of Specific Protein Binding Molecules”, *Science*, 249: 404-406, 1990; A. Ellington y J. Szostak, “In Vitro Selection of RNA Molecules that Bind Specific Ligands”, *Nature*, 346: 818-822, 1990.

¹¹ Comunicación personal, 1994.

tocatálisis sugiere que encontrar un anticuerpo capaz de catalizar una reacción arbitraria podría requerir la búsqueda de aproximadamente un millón a 1 000 millones de moléculas anticuerpo. El punto de enlace en la región V de una molécula anticuerpo es casi una serie de diversos péptidos aleatorios que se corresponde con las regiones complementarias determinadoras y que se mantiene fija gracias al resto de la estructura. Así, las bibliotecas de péptidos o polipéptidos más o menos aleatorios son posibles candidatos para fungir a la vez como sustratos y como catalizadores. De hecho, un reciente trabajo mío, con la colaboración de mi discípulo de posgrado Thomas LaBean y de Tauseef Butt, ha demostrado que tales polipéptidos aleatorios tienden a plegarse, asumiendo un estado globular derretido. Muchos muestran desplegamiento y replegamiento cooperativo en condiciones desnaturalizantes graduadas, sugiriendo que las capacidades de plegamiento modestas pueden ser comunes en las secuencias de aminoácidos.¹² Los resultados también muestran que los polipéptidos aleatorios pueden mostrar diversas funciones de ligamiento y de catálisis. Las pruebas anteriores que lo sustentan se derivan de los hexapéptidos aleatorios que se despliegan en la capa externa del fago filamentoso. La probabilidad de encontrar un péptido capaz de enlazar una molécula anticuerpo monoclonal colocada junto a otro péptido es de aproximadamente una en un millón.¹³ Ya que el enlace de un ligando y el enlace del estado de transición de una reacción son similares, estos resultados, junto con el éxito en encontrar anticuerpos catalíticos, sugieren que los péptidos aleatorios pueden catalizar fácilmente las reacciones entre los péptidos u otros polímeros. Las secuencias aleatorias de ARN también son candidatos interesantes. Los recientes resultados sobre la búsqueda, en las librerías aleatorias de ARN, de secuencias que enlacen un ligando arbitrario, sugieren que la probabilidad del éxito es de aproximadamente una en 1 000 millones.¹⁴ Resultados todavía más recientes de la búsqueda de secuencias de ARN capaces de una reacción sugieren una probabilidad de aproximadamente una en un billón. Acaso será más fácil encontrar secuencias aleatorias de péptidos capaces de catalizar una reacción arbitraria. Estos resultados, junto con los cálculos aproximados del número de reacciones que

¹² T. H. LaBean, T. H. Kauffman y T. R. Butt, "Design, Expression and Characterization of Random Sequence Polypeptides as Fusions with Ubiquitin", *FASEB Journal*, 6: A471, 1992; T. H. LaBean, T. H. Kauffman y T. R. Butt, "Library of Random-Sequence Polypeptides Produced with High Yield as Carboxy-Terminal Fusions with Ubiquitin", *Molecular Diversity*, 1: 29-38, 1995.

¹³ J. J. Devlin, L. C. Panganiban y P. A. Devlin, *op. cit.*; J. K. Scott y G. P. Smith, "Searching for Peptide Ligands with an Epitope Library", *Science*, 249: 386, 1990; P. Cwirla *et al.*, "Peptides on Phages: A Vast Library of Peptides for Identifying Ligands", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87: 6378-6382, 1990.

¹⁴ A. Ellington y J. Szostak, *op. cit.*

tales sistemas ofrecen, sugieren que acaso las diversidades de 100 000 a 1 000 000 de secuencias de polímeros de longitud 100, podrían lograr la autocatálisis colectiva.

LAS FUENTES DEL ORDEN DINÁMICO

Si la propuesta de Schrödinger no es necesaria para la emergencia de la vida, ¿entonces es por lo menos necesario o suficiente el sólido aperiódico del ADN para asegurar la variación heredable? La respuesta, que antes esboqué y ahora trataré de explicar más detalladamente, es “no”. El microcódigo contenido en el sólido aperiódico grande claramente no es suficiente para asegurar el orden. El genoma especifica una vasta red paralela procesadora de actividades. El comportamiento dinámico de esta red podría ser catastróficamente caótico, impidiendo que se heredara selectivamente debido a los comportamientos extremadamente variables del sistema codificado. La codificación en una estructura estable como el ADN no puede por sí misma asegurar que el sistema codificado se comporte con el suficiente orden como para producir una variación hereditaria seleccionable. Además, propondré que la codificación en un sólido aperiódico grande como el ADN no es necesaria para alcanzar el comportamiento dinámico estable que se requiere para la variación hereditaria seleccionable, tanto de las primitivas series colectivamente autocatalíticas, como de los organismos más avanzados. Lo que acaso se requiera en vez de eso es que el sistema sea cierto tipo de sistema termodinámico abierto capaz de mostrar una poderosa convergencia en su estado de espacio hacia atractores dinámicos estables y pequeños. El sistema abierto, desde otra perspectiva, debe ser capaz de descartar información, o grados de libertad, con la suficiente rapidez como para compensar las fluctuaciones térmicas y otros tipos de fluctuaciones.

Ahora resumiré brevemente el comportamiento de las redes aleatorias booleanas. Estas redes primero fueron presentadas como modelos de sistemas reguladores genómicos que coordinan las actividades de miles de genes y de sus productos dentro de cada célula de un organismo en desarrollo.¹⁵ Las redes booleanas aleatorias son ejemplos de sistemas no equilibrados, extremadamente desordenados, de masivos procesamiento paralelos, y se han convertido en un tema que cada vez interesa más a muchos físicos, matemáticos y otros científicos.¹⁶

¹⁵ S. A. Kauffman, “Metabolic Stability and Epigenesis in Randomly Connected Nets”, *Journal of Theoretical Biology*, 22: 431-467, 1969.

¹⁶ S. A. Kauffman, “Emergent Properties in Random Complex Automata”, *Physica*, 10D: 145-156,

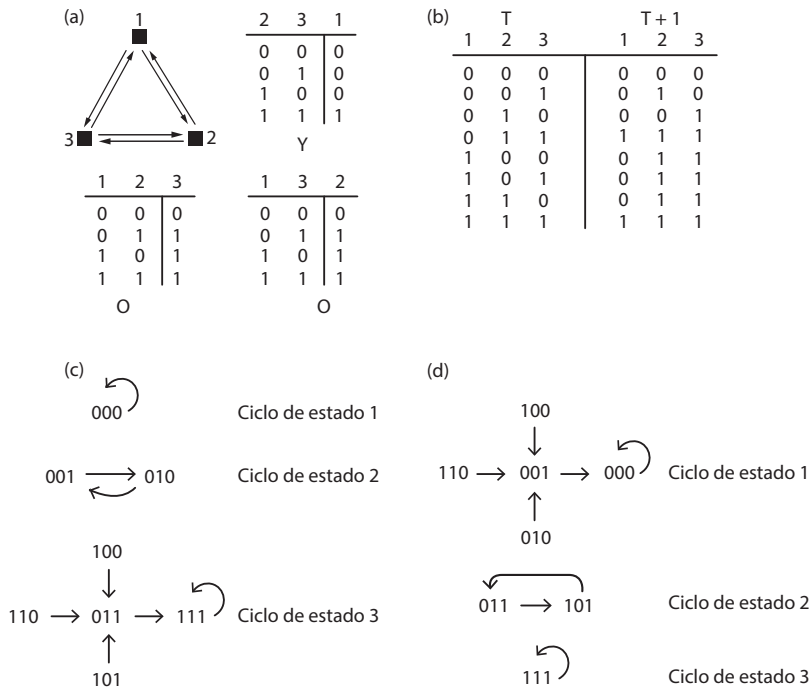


FIGURA XXX.2.

a) El diagrama de las conexiones en una red booleana con tres elementos binarios, siendo cada uno el input de los otros dos. b) Las reglas booleanas de (a), reformuladas para mostrar, en todos los $2^3 = 8$ estados en el momento T , la actividad que asume cada elemento un momento después, $T + 1$. De izquierda a derecha, esta figura muestra el estado sucesor para cada estado. c) Gráfica de la transición de estado, o campo de comportamiento, de la red autónoma booleana de (a) y (b), que se obtiene mostrando con flechas las transiciones de estado a estados sucesores. d) Efectos de la mutación de la regla del elemento 2, de O a Y.

Las redes booleanas aleatorias son sistemas dinámicos abiertos, desplazados del equilibrio por una fuente de energía exógena. Las redes son sistemas de variables binarias de activación/inactivación, cada una de las cuales se gobierna por una regla lógica de apagado y encendido, llamada función booleana. El nombre de las funciones booleanas se deriva de George Boole, un lógico inglés que inven-

1984; S. A. Kauffman, "Autocatalytic Sets of Proteins", *op. cit.*; S. A. Kauffman, *The Origins of Order*, *op. cit.*; B. Derrida y Y. Pomeau, "Random Networks of Automata: A Simple Annealed Approximation", *Europhysics Letters*, 1 (2): 45-49, 1986; B. Derrida y G. Weisbuch, "Evolution of Overlaps between Configurations in Random Boolean Networks", *Journal de Physique*, 47: 1297-1303, 1986; D. Stauffer, "Random Boolean Networks: Analogy with Percolation", *Philosophical Magazine B*, 56: 901-916, 1987.

tó la lógica matemática en el siglo pasado. Así, una variable binaria podría recibir los *inputs* de otras dos y activarse un momento después, sólo si el *input* uno y el *input* dos estaban activos un momento antes. Ésta es la función lógica, o la función *y* booleana. Alternativamente, una variable binaria con dos *inputs* podría activarse un momento después si uno o el otro, o ambos *inputs* están activos en el momento actual. Ésta es la función *o* booleana.

La figura xxx.2 (a-c) muestra una red booleana pequeña con tres variables, cada una de las cuales recibe los *inputs* de las otras dos. A una variable se le asigna la función *y*, y a las otras dos la función *o*. En el tipo más sencillo de redes booleanas, el tiempo es sincrónico. En cada momento cronometrado, cada elemento evalúa las actividades de sus *inputs*, busca la respuesta adecuada en su función booleana, y asume el valor específico. Además, en el caso más sencillo, la red no recibe *inputs* del exterior. Su comportamiento es totalmente autónomo.

Mientras que la figura xxx.2a muestra el diagrama de las interconexiones entre las tres variables, así como la regla booleana que gobierna a cada una de ellas, la figura xxx.2b muestra la misma información en un formato diferente. Definamos un estado de la red en su totalidad como las actividades actuales de todas las variables binarias. Así, si hay N variables binarias, entonces el número de estados es solamente 2^N . En el presente caso, con tres variables, sólo hay ocho estados. La serie de posibles estados de la red constituye su espacio de estado. La columna izquierda de la figura xxx.2b muestra estos ocho estados. La columna derecha muestra la respuesta, en el momento siguiente, de cada variable de todas las posibles combinaciones de las actividades de sus *inputs*. Sin embargo, otra manera de leer la figura xxx.2b es viendo que las filas de la mitad derecha de la figura se corresponden con las siguientes actividades de todas las tres variables. Por lo tanto, de izquierda a derecha, la figura xxx.2b especifica, para cada estado de la red en su totalidad, cuál será su estado sucesor.

La figura xxx.2c muestra el comportamiento dinámico integrado de la red en su totalidad. Ésta se deriva de la figura xxx.2b mediante la conexión de una flecha desde cada estado hasta su único estado sucesor. Puesto que cada estado tiene un solo estado sucesor, el sistema seguirá una trayectoria de estados en su espacio de estado. Ya que hay un número finito de estados, el sistema finalmente tendrá que reingresar en un estado previamente conocido. Pero entonces, puesto que cada estado tiene un solo estado sucesor, el sistema repetirá posteriormente un ciclo en torno al ciclo de estados recurrente, llamado ciclo de estados.

Muchas de las propiedades importantes de las redes booleanas se relacionan con los ciclos de estados del sistema, y con el carácter de las trayectorias que flu-

yen hasta tales ciclos de estado. Entre estas propiedades, la primera es la longitud de un ciclo de estado, que se limita a sí misma formando un estado estable, ya que el estado de ciclo podría orbitar a través de todos los estados del sistema. La longitud del ciclo de estado proporciona información sobre el tiempo de la recurrencia de los patrones de las actividades del sistema. Toda red booleana debe tener por lo menos un ciclo de estado, pero puede tener más de uno. La red en la figura xxx.2c tiene tres ciclos de estado. Cada estado yace en una trayectoria que fluye hasta o es parte de únicamente un ciclo de estado. Así, los ciclos de estado drenan un volumen de espacio de estado llamado cuenca de atracción. Al ciclo de estado mismo se le llama atractor. Una tosca analogía iguala los ciclos de estado a los lagos, y la cuenca de atracción al drenaje de la cuenca cuya corriente se vacía en cada lago.

El examen de la figura xxx.2c muestra que las trayectorias convergen. Las trayectorias convergen entre sí antes de alcanzar el ciclo de estado o, claro es, convergen cuando llegan al ciclo de estado. Esto significa que tales sistemas descartan información. Una vez que dos trayectorias convergen, el sistema ya no tiene la información para distinguir la vía mediante la cual llegó a su estado actual. Consecuentemente, mientras más grande es la convergencia en el espacio de estado, más información descarta el sistema. Veremos más adelante que esta eliminación del pasado es esencial para la emergencia del orden en estas redes masivas.

Otra propiedad interesante se relaciona con la estabilidad de los ciclos de estado para soportar las perturbaciones mínimas, revirtiendo transitoriamente la actividad de cualquier variable en particular. El examen de la figura xxx.2c muestra que el primer ciclo de estado es inestable ante todas estas perturbaciones. Cualquier perturbación de este tipo deja al sistema en la cuenca de atracción de un atractor diferente, hacia el cual el sistema fluye entonces. En cambio, el tercer ciclo de estado es estable ante cualquier perturbación mínima. Cada perturbación de este tipo deja al sistema en la misma cuenca de atracción, hacia la cual el sistema retorna tras la perturbación.

LOS RÉGIMENES CAÓTICOS, ORDENADOS Y COMPLEJOS

Tras casi tres decenios de investigación, ha quedado claro que las redes booleanas, al acercarse a la transición del orden al caos, se comportan genéricamente según uno de tres regímenes: un régimen caótico, un régimen ordenado y un régimen complejo. De los tres, acaso la emergencia espontánea de un régimen or-

denado que coordina las actividades de miles de variables binarias es la más sorprendente. Pienso que este tipo de orden colectivo espontáneo podría ser una de las fuentes más profundas del orden en el mundo biológico.

Primero describiré el régimen caótico, luego el ordenado y finalmente el complejo.

Antes de empezar, es importante caracterizar el tipo de cuestiones que se plantean. A mí me interesa entender las propiedades típicas, o genéricas, de las grandes redes booleanas en diferentes tipos de redes. En términos concretos, me interesan las redes con un gran número de variables binarias, N . Examinaré las redes clasificadas según el número de *inputs* por variable, K . También examinaré las redes con tendencias específicas en la serie de posibles funciones booleanas de los *inputs* K . Veremos que si K es pequeño, o si se utilizan ciertas tendencias, entonces incluso las enormes redes booleanas donde se vinculan las actividades de miles de variables permanecerán en el régimen ordenado. Por lo tanto, el control de unos cuantos parámetros de construcción sencillos basta para asegurar que los miembros típicos de la clase, o conjunto, muestren el orden. La implicación evolutiva es obvia: alcanzar el comportamiento coordinado de muy grandes cantidades de variables vinculadas puede lograrse mediante la calibración de los muy sencillos parámetros generales del sistema en su conjunto. El orden dinámico en gran escala es mucho más posible de lo que habíamos supuesto.

El propósito de estudiar las propiedades genéricas de las clases, o conjuntos, de las redes, exige que se investigue aleatoriamente a miembros del conjunto. El análisis de muchos de estos elementos elegidos al azar entonces conduce a comprender los comportamientos típicos de los miembros de cada conjunto. Por lo tanto, vamos a considerar las redes booleanas aleatoriamente construidas. Una vez que se construyen, el diagrama de las conexiones y la lógica de la red quedan determinados.

Primero examinaremos un caso limitante, donde $K = N$. Aquí, cada variable binaria recibe *inputs* de sí misma y de todas las demás variables binarias. Por lo tanto, únicamente es posible un solo diagrama de conexiones. Sin embargo, tales sistemas se pueden muestrear al azar en el conjunto de posibles redes $K = N$, asignándole a cada variable una función booleana aleatoria con base en sus *inputs* N . Esta función asigna, aleatoriamente, una respuesta de 1 o de 0 a cada configuración de *input*. Ya que esto sucede con cada una de las variables N , una red $K = N$ asigna aleatoriamente a cada estado un estado sucesor, seleccionado entre los 2^N estados. Así, las redes $K = N$ son planificaciones aleatorias de los 2^N enteros en sí mismos.

Las siguientes propiedades existen en las redes $K = N$. Primero, la longitud mediana esperada del ciclo de estado es la raíz cuadrada del número de estados. Hagamos una pausa para pensar sobre las consecuencias de esto. Una red pequeña con 200 variables entonces tendría ciclos de estado de una longitud 2^{100} . Esto equivale a aproximadamente 10^{30} estados. Si fuera necesario tan sólo un microsegundo para que el sistema pasara de estado en estado, a fin de que orbitara el mismo ciclo de estado tendría que transcurrir un tiempo equivalente a la historia del universo a partir del big bang, multiplicado varios miles de millones de veces.

Los largos ciclos de estado en las redes $K = N$ me permiten plantear un punto crítico en relación con el argumento de Schrödinger. Pensemos en el genoma humano. Cada célula de un cuerpo humano codifica unos 100 000 genes. Como todos sabemos, los genes regulan sus actividades entre sí mediante una red de interacciones moleculares. La transcripción se regula por secuencias de ADN, tales como las secuencias promotoras que actúan en *cis*, las cajas TATA, etc. Las actividades de los sitios activos en *cis*, a su vez, son controladas por factores que actúan en *trans*, con frecuencia proteínas codificadas por otros genes, que se difunden en el núcleo o en la célula, se enlazan al sitio que actúa en *cis* y regulan su comportamiento. Más allá del genoma, la traducción se regula por una red de señales, como son las actividades de un grupo de enzimas, cuyo estado de fosforilación se controla por otras enzimas, quinasas y fosfatasas, que son ellas mismas forforiladas y desfosforiladas. En resumen, el genoma y su producto directo e indirecto constituyen una intrincada red de interacciones moleculares. El comportamiento coordinado de este sistema controla el comportamiento celular y la ontogenia.

Supongamos que el genoma especifica redes regulatorias similares a la de una red $K = N$. La escala del tiempo requerido para que un gen se encienda o apague va de un minuto hasta acaso 10 minutos. Retengamos la idealización de que los genes y otros componentes moleculares del sistema regulatorio genómico son variables binarias. Un genoma con 100 000 genes que representan la complejidad del genoma humano, es capaz de una inverosímil diversidad de patrones de expresión génica: $2^{100\,000}$. Los atractores de ciclo de estado de tal sistema serían “apenas” $2^{50\,000}$ o $10^{15\,000}$. Para entender esta escala, recordemos que un minúsculo modelo de genoma con sólo 200 variables binarias requeriría miles de millones de veces la edad del universo para atravesar su órbita; $10^{15\,000}$ no es un número cuyo significado podamos siquiera entender. Pero ningún organismo podría basarse en ciclos de estado de tan inimaginable periodicidad.

En resumen, si el genoma humano, codificado por un sólido aperiódico llamado ADN, hubiera de especificar un sistema genómico regulatorio $K = N$, el

orden entronizado en el sólido aperiódico generaría un comportamiento dinámico de nula importancia biológica. La selección debida a las variaciones heredables requiere un fenotipo repetido sobre el cual operar. Un sistema genómico cuyos patrones de actividad génica fueran una sucesión de estados aleatoriamente elegidos que sólo se repitieran en $10^{15\,000}$ pasos no podría mostrar tal fenotipo repetido a partir del cual pudiera operar útilmente la selección.

Las redes $K = N$ tienen ciclos de estado cuya longitud crece exponencialmente con la dimensión del sistema. Utilizaré este crecimiento escalado para indicar un aspecto del comportamiento caótico de tales redes.

Pero las redes $K = N$ muestran otro aspecto caótico, más cercano al conocido. Estas redes muestran una sensibilidad tremenda a las condiciones iniciales. Cambios diminutos en las condiciones iniciales producen cambios masivos en la dinámica subsecuente. El estado sucesor de cada estado se elige aleatoriamente entre todos los estados posibles. Consideremos dos estados iniciales que difieren en la actividad de sólo una de las variables binarias N . Un ejemplo serían los estados (000000) y (000001). La distancia Hamming entre los dos estados binarios equivale al número de bits diferentes. Aquí, la distancia Hamming es 1. Si la distancia Hamming se divide por el número total de variables binarias, 6 en este ejemplo, la fracción de sitios diferentes, aquí $1/6$, es una distancia Hamming normalizada. Consideremos nuestros dos estados iniciales que difieren en un solo bit. Sus estados sucesores se eligen aleatoriamente entre los estados posibles de la red. Por lo tanto, la distancia Hamming entre los estados sucesores equivale a sólo la mitad de las variables binarias. La distancia normalizada salta de $1/N$ a $1/2$ en una sola transición de estado. En resumen, las redes $K = N$ muestran la máxima sensibilidad posible a las condiciones iniciales.

Para continuar con mi desacuerdo, si es que lo es, con la tesis del libro de Schrödinger, si el genoma humano fuera una red $K = N$, no sólo las orbitas de sus atractores serían hiperastronómicamente largas, sino que las perturbaciones más pequeñas producirían alteraciones catastróficas en el comportamiento dinámico del sistema. Una vez que tengamos el contraejemplo del régimen ordenado, será intuitivamente obvio que los sistemas $K = N$, profundamente insertados en el régimen caótico, no pueden representar la forma en que se organiza el sistema regulatorio genómico. Es además muy importante que la selección opera a partir de las variaciones heredables. En las redes $K = N$, las alteraciones menores en la estructura o la lógica de la red destruyen las trayectorias y los atractores del sistema. Por ejemplo, la supresión de un solo gen elimina la mitad del espacio de estado, particularmente aquel en que se encuentra activo el gen. Esto da como

resultado una reorganización masiva del flujo en el espacio de estado. Los biólogos especulan sobre las posibles vías evolutivas que podrían abrir los “monstruos”. Tales vías son altamente improbables. Las redes $K = N$ sólo podrían evolucionar mediante monstruos totalmente imposibles. En dos palabras, las redes $K = N$ no proporcionan prácticamente ninguna variación heredable a partir de la cual pueda actuar la selección.

Es necesario aclarar brevemente el término “caos”. Se ha establecido su definición claramente respecto a sistemas con unas cuantas ecuaciones diferenciales continuas. Estos sistemas de baja dimensión caen dentro de “atractores extraños” donde el flujo local es divergente pero permanece en el atractor. No se sabe claramente todavía cuál es la relación entre este tipo de caos de menor dimensión en los sistemas continuos y el caos de grandes dimensiones que describo aquí. Sin embargo, ambos comportamientos se han comprobado. Denominaré caos de grandes dimensiones a los sistemas con un gran número de variables donde las longitudes de las órbitas crecen exponencialmente con el número de variables, sistemas que muestran sensibilidad a las condiciones iniciales en el sentido antes definido.

El orden gratis: a pesar del hecho de que las redes booleanas pueden albergar miles de variables binarias, puede emerger inesperadamente un orden profundo. Creo que este orden es tan poderoso que puede ser la explicación de una gran parte del orden dinámico en los organismos. El orden emerge si se restringen algunos parámetros muy sencillos de tales redes. El parámetro más sencillo que se pueda controlar es K , el número de *inputs* por variable. Si $K = 2$ o menos, las redes típicas permanecen en el régimen ordenado.

Imaginemos una red con 100 000 variables binarias. A cada una se le ha asignado aleatoriamente $K = 2$ *inputs*. El diagrama de conexiones es un loco enjambre de interconexiones con ninguna lógica discernible, de hecho sin ninguna lógica en absoluto. A cada variable binaria se le asigna aleatoriamente una de las posibles 16 funciones booleanas de dos variables, Y, O, SI, O exclusivo, etc. La lógica de la red misma es, por lo tanto, totalmente aleatoria. Y sin embargo el orden se cristaliza.

La longitud esperada del ciclo de estado en tales redes no es la raíz cuadrada del número de estados, sino la raíz cuadrada del número de variables. Así, un sistema con la complejidad del genoma humano, con 100 000 genes y $2^{100\,000}$ estados, solamente realiza su ciclo entre 317 estados. Y 317 es una subserie infinitesimal de la serie de $2^{100\,000}$ posibles estados. La relativa localización en el espacio de estado es del orden de $2^{-99\,998}$.

Las redes booleanas son sistemas termodinámicos abiertos. En el caso más sencillo, pueden construirse con puertas lógicas reales, con una fuente de poder eléctrica exógena. Pero este tipo de sistemas termodinámicos abiertos muestra una convergencia masiva en el espacio de estado. Esta convergencia aparece de dos maneras. En general, tales sistemas muestran una profunda carencia de sensibilidad a las condiciones iniciales. La primera firma de la convergencia es que la mayoría de las perturbaciones de un solo bit abandonan el sistema en trayectorias que posteriormente convergen. Esta convergencia ocurre incluso antes de que el sistema haya llegado hasta los atractores. En segundo lugar, las perturbaciones de un atractor suelen abandonar el sistema en un estado que retorna al mismo atractor. Los atractores, en un sentido biológico, espontáneamente muestran la homeostasis. Ambas firmas de la convergencia son importantes. La estabilidad de los atractores implica un comportamiento repetible en la presencia de ruido. Pero la convergencia del flujo, incluso antes de que se llegue a los atractores, implica que los sistemas en el régimen ordenado pueden reaccionar en ambientes similares de la “misma” manera, incluso si las perturbaciones producidas por los *inputs* ambientales le impiden incesantemente al sistema llegar a un atractor. La convergencia a lo largo de las trayectorias puede permitirles a tales sistemas adaptarse exitosamente a un medio ambiente ruidoso.

Estas homeostasis que refleja la convergencia en el espacio de estado contrasta con la perfecta conservación del volumen de fase en los sistemas termodinámicamente equilibrados cerrados. Recordemos que la teoría de Liouville asegura tal conservación, la cual a su vez refleja la reversibilidad de los sistemas cerrados y el fracaso en desechar la información. Esta conservación subyace en la capacidad para predecir las probabilidades de los macroestados mediante el número fraccional de los microestados que contribuyen a cada macroestado.

La repercusión más importante de la conservación del volumen de fase en los sistemas es la siguiente: Schrödinger observó correctamente el hecho de que las fluctuaciones en cualquier sistema clásico varían inversamente con la raíz cuadrada del número de los sucesos bajo consideración. Cuando el sistema es un sistema equilibrado, estas fluctuaciones tienen cierta amplitud. Sin embargo, si consideramos un sistema termodinámico abierto con congruencia masiva en el espacio de estado, entonces esa convergencia tiende a compensar las fluctuaciones. La convergencia tiende a contraer el sistema hacia los atractores, mientras que las fluctuaciones tienden a impulsar al sistema aleatoriamente en su espacio de posibilidades. Pero si la convergencia es suficientemente poderosa, puede obligar al movimiento sin rumbo, inducido por el ruido, a permanecer en la vecindad infi-

nitesimal de los atractores del sistema. De esta manera llegamos a una conclusión crítica. Las fluctuaciones inducidas por el ruido, causadas por pequeñas cantidades de moléculas, que a Schrödinger le interesaban, en principio pueden compensarse por el flujo convergente hacia los atractores, si este flujo es suficientemente convergente. La homeostasis puede superar la termalización.

Pero esta conclusión es medular en mi cuestionamiento de Schrödinger. Pues yo quiero sugerir la posibilidad de que la utilización por los organismos de un sólido aperiódico como portador estable de la información genética no es suficiente para asegurar el orden. El sistema codificado podría ser caótico. Tampoco es necesario el sólido aperiódico. Más bien, el flujo convergente de los sistemas en el régimen ordenado es tanto necesario como suficiente para el orden requerido.

REDES RETICULADAS BOOLEANAS Y EL BORDE DEL CAOS

Una sencilla modificación de las redes aleatorias booleanas nos ayuda a entender los regímenes ordenados, caóticos y complejos. En vez de pensar en un diagrama de conexiones aleatorio, consideremos una retícula cuadrada, donde cada sitio obtiene *inputs* de sus cuatro vecinos. Démosle a los cuatro *inputs* de cada sitio binario una función booleana aleatoria. Pongamos en funcionamiento el sistema en un estado inicial aleatoriamente elegido y permitamos que la retícula evolucione hacia adelante en el tiempo. A cada paso temporal, cualquier variable puede cambiar su valor de 1 a 0 o de 0 a 1. Si es así, pintemos a esa variable de verde. Si el valor de la variable no cambia, sino que permanece como 1 o como 0, pintémosla de rojo. El color verde significa que la variable esta “descongelada” o que se “mueve”; el color rojo significa que la variable se ha dejado de mover o que está “congelada”.

Ahora voy a introducir una tendencia sencilla entre todas las funciones booleanas. Cualquiera de estas funciones proporciona un valor de *output*, 1 o 0, para cada combinación de los valores de sus *inputs* K . La serie de valores de *output* podría ser, casi la mitad de valores 1, y casi la mitad de valores 0, o podría inclinarse hacia todos los valores 1 o todos los valores 0. Dejemos que P sea la medida de esta tendencia. P es la fracción de la combinación de *inputs* que dan origen al valor más frecuente, ya sea 1 o 0. Por ejemplo, en el caso de la función Y , tres de las cuatro configuraciones de *input* dan una respuesta de 0. Sólo si ambos *inputs* equivalen a 1, la variable regulada será 1 un momento después. En este caso, P es 0.75. Por lo tanto, P es un número entre 0.5 y 1.0.

Derrida y Weisbuch demostraron que una retícula booleana quedará en el régimen ordenado si las funciones booleanas asignadas a sus sitios se eligen aleatoriamente, con el requisito de que el valor P en cada sitio esté más cercano a 1.0 que a un valor crítico.¹⁷ Para una retícula cuadrada, el valor crítico, P_c , es 0.72.

Consideremos una “película” similar, la de una red en el régimen ordenado, donde nuevamente los sitios en movimiento son verdes, y los sitios congelados rojos. Si P es mayor que P_c , entonces al inicio la mayoría de los sitios son verdes. Pronto, sin embargo, un número creciente de sitios se congelan en su valor dominante, 1 o 0, y son rojos. Un vasto mar rojo congelado se extiende o percola a través de la retícula, dejando aisladas islas verdes de variables descongeladas que siguen brillando intermitentemente, formando complejos diseños. La percolación de un mar rojo congelado con islas verdes descongeladas es característica del régimen ordenado.

Una transición de fase ocurre en tales redes booleanas reticuladas cuando P se calibra desde más de P_c a menos de P_c . Cuando se va llegando a la transición de fase desde arriba, las islas verdes descongeladas se vuelven más grandes y finalmente se fusionan entre sí para formar un mar verde descongelado. La transición de fase ocurre justo al darse esta fusión.

Con esta imagen en la mente, será útil definir el “daño”. El daño consiste en los disturbios que se propagan en la red tras haberse revertido transitoriamente la actividad de un sitio. Para estudiar esto es suficiente hacer dos copias idénticas de la red e iniciarlas en dos estados que difieren en la actividad de una sola variable. Hay que observar las dos copias, y pintar de morado cualquier sitio en la copia perturbada que jamás tenga un valor de actividad diferente al de su copia no perturbada. Entonces una mancha morada que se extiende desde el sitio perturbado demarca el daño que se propaga desde ese sitio.

En el régimen caótico, dejemos que se dañe un sitio en el mar verde descongelado. Entonces, genéricamente, una mancha morada se extiende a través de la mayor parte del mar verde. De hecho, la dimensión esperada del volumen dañado crece con la dimensión del sistema reticulado total.¹⁸ Ahora dañemos un sitio en un régimen ordenado. Si este sitio yace en una de las islas verdes descongeladas, el daño podría extenderse a través de la mayor parte de esta isla, pero no invadirá la estructura roja congelada. En resumen, la estructura congelada roja bloquea la propagación del daño, y por lo tanto proporciona gran parte de la estabilidad homeostática del sistema.

¹⁷ B. Derrida y G. Weisbuch, *op. cit.*

¹⁸ D. Stauffer, *op. cit.*

En la transición de fase, se supone que es una ley de poder el tamaño de la distribución de las avalanchas del daño, con muchas avalanchas pequeñas y unas cuantas grandes. La transición de fase es un régimen complejo. Además de la característica distribución de las avalanchas del daño, la convergencia media a lo largo de las trayectorias cercanas a los vecinos Hamming es de cero. Así, en el régimen caótico, los estados iniciales cercanos a los vecinos Hamming tienden, en promedio, a divergir entre sí mientras cada uno fluye a lo largo de su propia trayectoria. Esta es la “sensibilidad a las condiciones iniciales” de que he hablado. En el régimen ordenado, los estados cercanos tienden a converger entre sí, con frecuencia fluyendo en la misma trayectoria antes de llegar a un atractor común. En la transición de fase al borde del caos, los estados cercanos ni convergen ni divergen, en promedio.

Es una hipótesis atractiva el que los sistemas adaptativos complejos puedan evolucionar hasta el régimen complejo al borde del caos. Las propiedades del régimen al borde del caos les han sugerido a diversos investigadores¹⁹ que el régimen de transición de fase, o borde del caos, puede ser muy adecuado para computaciones complejas. A primera vista, la idea es atractiva. Supongamos que quisiéramos que tal sistema coordinara el comportamiento complejo temporal de sitios muy distanciados. En la profundidad del régimen ordenado, las islas verdes que podrían realizar una secuencia de actividades cambiantes están aisladas unas de las otras. No puede ocurrir ninguna coordinación entre ellas. En la profundidad del régimen caótico, la coordinación podría trastornarse por cualquier perturbación que desencadene una gran avalancha de cambio. Por lo tanto, es muy posible que cerca de la transición de fase, acaso en el régimen ordenado, la capacidad para coordinar los comportamientos complejos pudiera optimizarse.

Sería fascinante que esta hipótesis fuera verdadera. Empezaríamos a tener una teoría general sobre la estructura y la lógica internas de los sistemas adaptativos complejos de procesamiento paralelo. Según esta teoría, la adaptación selectiva de la capacidad misma de coordinar el comportamiento complejo debería permitir que los sistemas adaptativos evolucionaran hasta la transición de fase misma, o hasta su vecindad.

Ciertos indicios preliminares empiezan a sustentar la hipótesis de que los sistemas complejos con frecuencia evolucionan, no precisamente hasta el borde del

¹⁹ C. Langton, “Studying Artificial Life with Cellular Automata”, *Physica*, 22D: 120-149, 1986; C. Langton, “Adaptation to the Edge of Chaos”, en C. Langton *et al.*, *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 11-92; N. Packard, “Dynamic Patterns in Complex Systems”, en J. A. S. Kelso y M. Shelesinger (comps.), *Complexity in Biologic Modeling*, World Scientific, Singapur, 1988, pp. 293-301; S. A. Kauffman, *The Origins of Order*, *op. cit.*

caos, sino hasta el régimen ordenado al borde del caos. A fin de comprobar esto, mis colaboradores y yo en el Santa Fe Institute estamos permitiendo que las redes booleanas coevolucionen conjuntamente a fin de “jugar” diversos juegos. En todos los casos, los juegos involucran la percepción de los elementos de las otras redes y la construcción de una respuesta apropiada a algunas de las variables del *output* de una red. La coevolución de estas redes les permite alterar K , P , y otros parámetros a fin de optimizar el éxito en cada juego mediante la selección natural. En resumen, tales redes efectivamente mejoran en la serie de juegos que les hemos pedido que lleven a cabo. Como siempre, este tipo de búsqueda evolutiva tiene lugar en presencia de procesos de desplazamiento aleatorio mutacionales que tienden a dispersar una población adaptativa a través del espacio de posibilidades que explora. A pesar de esta tendencia al desplazamiento, existe una fuerte tendencia a evolucionar hacia una posición dentro del régimen ordenado no muy lejana de la transición al caos. En una palabra, ciertos indicios sustentan la hipótesis de que una gran variedad de sistemas de procesamiento paralelos evolucionan hasta el régimen ordenado cerca de la transición de fase a fin de coordinar tareas complejas.

Las investigaciones futuras en este campo habrán de examinar la cuestión central de mi cuestionamiento a Schrödinger. Podría haber dos fuentes de “ruido” en tales redes booleanas que participan en juegos. La primera se deriva de los *inputs* que llegan de otras redes. Estos *inputs* exógenos desvían a cada sistema de su trayectoria actual, y por lo tanto perturban su flujo hacia los atractores. La segunda es el ruido térmico dentro de cualquier red. Ese ruido interno tenderá a perturbar el comportamiento del sistema. A fin de que compensaran esta perturbación y lograran la coordinación, se esperaría que tales sistemas se desplazaran hasta más adentro del régimen ordenado. Allí la convergencia en el espacio de estado es más fuerte, y por lo tanto proporciona una protección más poderosa contra el ruido exógeno. Por ende, podemos preguntar: ¿cuánta convergencia se requiere para compensar una cantidad dada de ruido interno?

El mismo problema surge en cualquier sistema cuya dinámica interna se controle por pequeñas cantidades de copias de cada tipo de molécula. Esto sucede en las células contemporáneas, donde el número de proteínas reguladoras y de otras moléculas en cada célula con frecuencia está dentro del rango de una sola copia. El mismo problema surge en los sistemas moleculares colectivamente autocatalíticos que sospecho pudieron haberse formado en el inicio de la vida. ¿Cuánta convergencia en el espacio de estado compensa las fluctuaciones debidas a la utilización de pequeñas cantidades de moléculas en un sistema dinámico, y cómo se

corresponde la convergencia requerida con el decrecimiento del número de copias de cada tipo de molécula en el sistema modelo? En relación con las series de moléculas colectivamente autocatalíticas, presumiblemente cierta convergencia lo suficientemente alta en el espacio de estado protegerá tales sistemas de las fluctuaciones debidas al potencialmente pequeño número de copias de cada tipo de molécula en un metabolismo que se reproduce colectivamente. Si es así, la estructura estable de los sólidos aperiódicos grandes no es necesaria ni suficiente para el orden necesario para la emergencia de la vida o para esas variaciones heredables sobre las cuales la selección puede actuar exitosamente.

ORDEN Y ONTOGENIA

Hemos visto que incluso las redes booleanas aleatorias pueden mostrar espontáneamente un inesperado y alto grado de orden. Sería simplemente una tontería ignorar la posibilidad de que tal orden espontáneo pueda desempeñar una función en la emergencia y en el mantenimiento del orden en la ontogenia. Aunque no se han confirmado todavía las pruebas de esto, creo que sustentan considerablemente la hipótesis. Describiré con brevedad las pruebas de que las redes reguladoras genómicas realmente se encuentran en el régimen ordenado, acaso no muy lejos del borde del caos. Primero, si uno examina los genes regulados conocidos de los virus, de las bacterias y de los eucariotas, la mayoría se controla directamente por unos cuantos *inputs* moleculares, típicamente de 0 a acaso 8. Es fascinante que en la idealización de apagado/encendido booleana, casi todos los genes regulados conocidos se gobiernan por una subserie de posibles funciones booleanas que yo he denominado desde hace mucho funciones “canalizadoras”.²⁰ Aquí, por lo menos un *input* molecular tiene un valor, 1 o 0, que por sí mismo es suficiente para garantizar que el sitio regulado asuma un estado de *output* específico, ya sea 1 o 0. Así, la función O de cuatro *inputs* es canalizadora, ya que el primer *input*, si es activo, garantiza que el elemento regulado esté activo, a pesar de las actividades de los otros tres *inputs*. Las redes booleanas con más de $K = 2$ *inputs* por elemento, pero limitadas en gran parte a funciones canalizadoras, yacen genéticamente en el régimen ordenado.²¹ Desde hace algunos años, he interpretado los atractores de una red genética, los ciclos de estado, como los tipos de

²⁰ A. Kauffman, “Cellular Homeostasis, Epigenesis and Replication in Randomly Aggregated Macromolecular Systems”, *op. cit.*; S. A. Kauffman, *The Origins of Order*, *op. cit.*

²¹ S. A. Kauffman, *The Origins of Order*, *op. cit.*

células en el repertorio del sistema genómico. Entonces las longitudes de los ciclos de estado predicen que los tipos de células deben ser patrones recurrentes muy restringidos de la expresión del gen, y también predicen que las células deben realizar su ciclo en un tiempo de cientos a miles de minutos. Además, el número de atractores decrece en proporción a la raíz cuadrada del número de variables. El hecho de que un atractor sea un tipo de célula nos permite predecir que el número de tipos de células en un organismo debe decrecer aproximadamente en proporción a la raíz cuadrada del número de sus genes. Esto parece ser cualitativamente correcto. Se podría predecir que los humanos, con cerca de 100 000 genes, tendrían cerca de 317 tipos de células. De hecho, se dice que los humanos tienen cerca de 256 tipos de células,²² y el número de tipos de células parece corresponderse con una relación que yace entre una función lineal y una función de raíz cuadrada, de la complejidad genética.²³ El modelo predice otros aspectos, como la estabilidad homeostática de los tipos de células. El componente congelado rojo predice, correctamente, que cerca de 70% de los genes deben estar en los mismos estados fijos de actividad en todos los tipos de células del organismo. Además, las dimensiones de las islas verdes predicen razonablemente bien las diferencias en los patrones de la actividad de los genes en los tipos de células diferentes de un organismo. La distribución de las dimensiones de las avalanchas probablemente puede predecir la distribución de las crecientes alteraciones de las actividades de los genes, tras perturbar las actividades de los genes aleatoriamente elegidos. Finalmente, en el régimen ordenado, las perturbaciones sólo pueden impulsar al sistema desde un atractor hacia otros. Si los atractores son tipos de células, esta propiedad predice que la ontogenia se debe organizar en torno a las vías ramificadas de la diferenciación. Ningún tipo de célula debe, y de hecho no puede, diferenciarse directamente de todos los tipos de células. Esta es una propiedad que presumiblemente ha existido realmente en todos los organismos multicelulares desde el periodo Cámbrico o incluso desde antes.

Este espacio sólo permite una breve presentación de estas ideas. Sin embargo, hoy se puede decir en resumen que los sistemas reguladores genómicos bien podrían ser sistemas de procesamiento paralelo que yacen en el régimen ordenado. Si es así, entonces la convergencia característica en el espacio de estado de estos sistemas es una fuente principal de su orden dinámico.

Pero la autoorganización que aquí examino tiene implicaciones aún más dramáticas. Desde Darwin nos hemos convencido de que la selección es la única

²² B. Alberts *et al.*, *Molecular Biology of the Cell*, Garland Science, Nueva York, 2002.

²³ S. A. Kauffman, *The Origins of Order*, *op. cit.*

fuentes del orden en la biología. Hemos llegado a creer que los organismos son artilugios ensamblados, una amalgama de principios estructurales, de aleatoriedad y de necesidad. Creo que este punto de vista no es adecuado. Darwin no conocía el poder de la autoorganización. De hecho, nosotros apenas lo vislumbramos. Tal autoorganización, desde el origen de la vida hasta su dinamismo coherente, ha tenido que jugar un papel esencial en nuestra historia de la vida, de hecho, diría yo, en cualquier historia de la vida. Pero Darwin también tenía la razón. La selección natural actúa incesantemente. Por tanto, debemos repensar la teoría de la evolución. La historia natural de la vida es cierto tipo de unión entre la autoorganización y la selección. Debemos encontrar una nueva manera de ver la vida; tenemos que desentrañar las nuevas leyes de su desarrollo.

RESUMEN

En un periodo en que no tenía derecho a saberlo con tanta clarividencia, Schrödinger previó correctamente que la vida actual se basa en la estructura de los sólidos aperiódicos grandes. Presintió que la estabilidad de estos sólidos podría proporcionar la sustancia estable portadora de la información genética. Un microcódigo dentro de la sustancia especificaría el organismo. Las alteraciones cuánticas en la sustancia serían específicas, raras, y constituirían mutaciones. Schrödinger descifró correctamente muchos de los aspectos de la vida contemporánea.

Pero, en un nivel más fundamental, ¿descifró correctamente la vida misma? ¿Es necesaria para la vida la memoria estructural del sólido aperiódico? Sin duda alguna, en el sentido mínimo de que las moléculas orgánicas con enlaces covalentes son “sólidos aperiódicos” pequeños, el argumento de Schrödinger es meritorio en general. Por lo menos en el caso de la vida basada en el carbono, se requieren enlaces que tengan la suficiente fuerza como para ser estables en un medio ambiente dado. Pero es el comportamiento de los grupos de esas moléculas lo que constituye la vida en la Tierra y lo que podemos suponer que subyace en muchas formas de vida potenciales en cualquier lugar del universo. Los organismos vivientes son, de hecho, sistemas moleculares colectivamente autocatalíticos. Ciertos nuevos indicios empíricos y teóricos, arriba citados, sugieren que la emergencia de los sistemas moleculares autorreproductores no requiere sólidos aperiódicos grandes. La evolución limitada de tales sistemas no requiere, en principio, sólidos aperiódicos grandes. Tampoco se determina el orden dinámico y la

variación heredable por un sólido aperiódico que codifique la estructura y algunas de las interacciones de una gran cantidad de otras moléculas. Más bien, la variación heredable en los sistemas químicos autorreproductores, a partir de la cual la selección natural podría verosímilmente actuar, requiere la estabilidad dinámica. Esto, a su vez, puede lograrse por los sistemas termodinámicos abiertos que convergen suficientemente en sus espacios de estado para compensar las fluctuaciones que se derivan del hecho de que sólo participa una pequeña cantidad de moléculas.

No constituye una crítica a Schrödinger señalar que él no tomó en consideración los comportamientos autoorganizados de los sistemas termodinámicos abiertos. La investigación de tales sistemas apenas se había iniciado hace 50 años y no ha avanzado mucho hoy. De hecho, todo lo que hoy en verdad podemos decir es que los tipos de autoorganización que hemos empezado a vislumbrar en tales sistemas termodinámicos abiertos, al parecer están modificando nuestra perspectiva sobre el origen y la evolución de la vida. Es más que suficiente que Schrödinger haya presentado tantas cosas. Cuánto quisiéramos que hoy su sabiduría estuviera viva para ayudar al avance de su historia y al progreso de la nuestra.

BIBLIOGRAFÍA

- Alberts, B., D. Bray, J. Lewis, M. Raff, K. Roberts y J. D. Watson, *Molecular Biology of the Cell*, Garland Science, Nueva York, 2002. [Versión en español: *Biología molecular de la célula*, trad. de Mercé Durfort, Omega, Barcelona, 2008.]
- Bagley, R. J., *The Functional Self-organization of Autocatalytic Networks in a Model of the Evolution of Biogenesis*, tesis de doctorado, San Diego, 1991.
- Bagley, R. J., J. D. Farmer y W. Fontana, "Evolution of a Metabolism", en C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rasmussen (comp.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 371-408.
- Ballivet, M., y S. A. Kauffman, *Process for Obtaining DNA, RNA, Peptides, Polypeptides or Proteins by Recombinant DNA Techniques*, 1985.
- Cohen, J. E., "Threshold Phenomena in Random Structures", *Discrete Applied Mathematics*, 19: 113-118, 1988.
- Cwirla, P., E. A. Peters, R. W. Barrett y W. J. Dower, "Peptides on Phages: A Vast Library of Peptides for Identifying Ligands", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 87: 6378-6382, 1990.

- Derrida, B., y Y. Pomeau, "Random Networks of Automata: A Simple Annealed Approximation", *Europhysics Letters*, 1 (2): 45-49, 1986.
- Derrida, B., y G. Weisbuch, "Evolution of Overlaps between Configurations in Random Boolean Networks", *Journal de Physique*, 47: 1297-1303, 1986.
- Devlin, J. J., *et al.*, "Random Peptide Libraries: A Source of Specific Protein Binding Molecules", *Science*, 249: 404-406, 1990.
- Eigen, M., "Self-organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules", *Naturwissenschaften*, 58: 465-523, 1971.
- Ellington, A., y J. Szostak, "In Vitro Selection of RNA Molecules that Bind Specific Ligands", *Nature*, 346: 818-822, 1990.
- Erdős, P., y A. Rényi, "On the Evolution of Random Graphs", *Magyar Tud. Akad. Mat. Kutató Int. Közl.*, 5: 17-61, 1960.
- Farmer, J. D., S. A. Kauffman y N. H. Packard, "Autocatalytic Replication of Polymers", *Physics*, 22D: 50-67, 1986.
- Kauffman, S. A., "Autocatalytic Sets of Proteins", *Journal of Theoretical Biology*, 119: 1-24, 1986.
- , "Cellular Homeostasis, Epigenesis and Replication in Randomly Aggregated Macromolecular Systems", *Journal of Cybernetics*, 1: 71, 1971.
- , "Emergent Properties in Random Complex Automata", *Physica*, 10D: 145-156, 1984.
- , "Metabolic Stability and Epigenesis in Randomly Connected Nets", *Journal of Theoretical Biology*, 22: 431-467, 1969.
- , *The Origins of Order: Self-organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, Oxford, 1993.
- LaBean, T. H., S. A. Kauffman y T. R. Butt, "Design, Expression and Characterization of Random Sequence Polypeptides as Fusions with Ubiquitin", *FASEB Journal*, 6: A471, 1992.
- , "Library of Random-Sequence Polypeptides Produced with High Yield as Carboxy-Terminal Fusions with Ubiquitin", *Molecular Diversity*, 1: 29-38, 1995.
- Langton, C., "Adaptation to the Edge of Chaos", en C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 11-92.
- , "Studying Artificial Life with Cellular Automata", *Physica*, 22D: 120-149, 1986.
- Orgel, L. E., "Evolution of the Genetic Apparatus: A Review", *Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology*, 52: 9-15, 1987.
- Packard, N., "Dynamic Patterns in Complex Systems", en J. A. S. Kelso y M. Shlesinger (comps.), *Complexity in Biologic Modeling*, World Scientific, Singapur, 1988, pp. 293-301.

- Rossler, O., "A System-Theoretic Model of Biogenesis", *Zeitschrift für Naturforschung A*, B266: 741, 1971.
- Schrödinger, E., *What is Life? With "Mind and Matter" and Autobiographical Sketches*, Cambridge University Press, Cambridge, 1967. [Versión en español: *¿Qué es la vida?*, Tusquets, Madrid, 1997.]
- Scott, J. K., y G. P. Smith, "Searching for Peptide Ligands with an Epitope Library", *Science*, 249: 386, 1990.
- Stauffer, D., "Random Boolean Networks: Analogy with Percolation", *Philosophical Magazine B*, 56: 901-916, 1987.
- Von Kiederowski, G., "A Self-replicating Hexadesoxynucleotide", *Angewandte Chemie International Edition in English*, 25: 932-935, 1986.

Mark A. Bedau*

XXXI. CUATRO ENIGMAS SOBRE LA VIDA**

QUÉ EXPLICA EL FENÓMENO DE LA VIDA

La vida parece ser uno de los más básicos tipos de fenómenos naturales existentes. Una asombrosa variedad de formas de vida nos rodea, pero para nosotros no suele resultar difícil distinguir entre lo viviente y lo no viviente. Esa flor, ese gusano, ese pájaro están vivos; esa roca, esa montaña, ese río, esa nube no lo están. De la misma manera que cualquier intento de disecar la naturaleza debe tomar en consideración la mente y la materia, también debe tomar en consideración la vida.

Sin embargo, es notoriamente difícil decir qué es la vida, exactamente. Son muchos quienes han observado esto;¹ Farmer y Belin lo exponen así:²

Al parecer no hay una propiedad que por sí sola caracterice la vida. Cualquier propiedad que asignemos a la vida es demasiado amplia, de manera que caracteriza a muchos sistemas no vivientes también, o demasiado específica, de manera que podemos encontrar contraejemplos que intuitivamente sentimos que representan entes vivientes, pero que no la satisfacen.

* Quiero expresar mi agradecimiento a Hugo Bedau, Maggie Boden, Andy Clark, Peter Godfrey-Smith, David McFarland, Dan McShea, David Reeve, Francisco Varela, Bill Wimsatt, Marty Zwick por las discusiones que sostuve con ellos sobre estos temas o por los comentarios que hicieron sobre las versiones anteriores de este trabajo. Gracias también a la audiencia, en la primavera de 1997, de la Philosophy of Artificial Life, PAL97, en Christ Church, Universidad de Oxford; a la audiencia en el verano de 1997 de la Fourth European Conference on Artificial Life, ECAL97, en Brighton, Inglaterra; a la audiencia en el invierno de 1998 de mi Systems Science Colloquium en la Universidad de Portland State, y a los comentaristas anónimos de esta publicación. Gracias al Santa Fe Institute por su apoyo y hospitalidad. Gracias especialmente a Norman Packard por colaborar conmigo a lo largo de los años, influyendo profundamente en mis reflexiones sobre este tema.

** Este capítulo apareció originalmente en *Artificial Life*, 4 (2): 125-140, 1998. Cortesía de The MIT Press Journals ©.

¹ C. Taylor, "Fleshing Out", en C. G. Langton *et al.* (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 371-408.

² D. Farmer y A. Belin, "Artificial Life: The Coming Evolution", en C. G. Langton *et al.* (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 815-840.

El hecho es que hoy no se ha determinado una serie de condiciones individualmente necesarias y conjuntamente suficientes para la vida.

Sin embargo, generalmente se está de acuerdo en que las formas de vida comparten ciertos signos distintivos. En la literatura se discuten varios de éstos, y la lista de Mayr es al respecto representativa e influyente:³

1. Todos los niveles de los sistemas vivos tienen una organización enormemente compleja y adaptativa.
2. Los organismos vivos se componen de una serie de macromoléculas químicamente singulares.
3. Los fenómenos importantes en los sistemas vivos son predominantemente cualitativos, no cuantitativos.
4. Todos los niveles de los sistemas vivos consisten en grupos altamente variables de individuos únicos.
5. Todos los organismos poseen programas genéticos que han evolucionado históricamente y que les permiten emprender procesos y actividades teleonómicos.
6. Las clases de los organismos vivos se definen por sus conexiones históricas a partir de una descendencia común.
7. Los organismos son el producto de la selección natural.
8. Los procesos vivos son especialmente impredecibles.

Estoy de acuerdo con Mayr en que la coexistencia de estas propiedades “muestra claramente que un sistema vivo es una cosa muy diferente de cualquier objeto inanimado”, de manera que sospecho que debe existir una explicación unificada de los fenómenos vitales.⁴ Al mismo tiempo, resulta desconcertante que tales heterogéneas propiedades coexistan en la naturaleza, especialmente porque los entes no vivos pueden poseer todos los signos distintivos mencionados.

Las apariencias pueden ser engañosas. Podría no haber una explicación unificada de los fenómenos vitales y la vida podría no ser un tipo básico de fenómeno natural. Los escépticos como Sober piensan que para la cuestión de la naturaleza de la vida en general no puede haber una respuesta interesante.⁵ Pero pienso de otra manera, junto con aquellos que hoy están buscando la vida extraterrestre;⁶

³ E. Mayr, *The Growth of Biological Thought*, Harvard University Press, Cambridge, 1982.

⁴ *Ibid.*, p. 59.

⁵ E. Sober, “Learning from Functionalism — Prospects for Strong Artificial Life”, *Artificial Life*, 2: 749-765, 1992.

⁶ C. F. Chyba y G. D. McDonald, “The Origin of Life in the Solar System: Current Issues”, *Annual*

no sólo están buscando metabolizadores y autorreproductores extraterrestres. Y también con los que están buscando el origen de la vida en la Tierra.⁷ Y también con aquellos que intentan sintetizar la vida con medios artificiales en el campo de la vida artificial.⁸ Todo ello significa una búsqueda de una teoría unificada de los fenómenos vitales basada en amplias y extensas investigaciones que tan sólo como último recurso debería elegir, si es que debiera hacerlo en absoluto, la retirada hacia el escepticismo.

Así que estamos ante un dilema. Creemos que debe haber una teoría unificada de la vida pero dudamos de que la vida tenga las condiciones necesarias y suficientes como para definirse. Podemos solucionar este dilema si repensamos nuestro proyecto en dos formas. Primero, tenemos que enfocar los *fenómenos* de la vida, no nuestro actual concepto de la vida, y tampoco el significado actual de la palabra “vida”. Los físicos y los químicos pretenden explicar la materia misma, no nuestro concepto actual de la materia o el significado actual de la palabra “materia”. Yo pretendo explicar la vida misma; esta explicación es lo que yo entiendo por *teoría* de la vida. No tiene importancia que esta teoría sustente o no nuestras actuales presuposiciones sobre la vida o se ajuste al actual significado de la palabra “vida”. Nuestro actual concepto de la vida y el actual significado de la palabra “vida” están sujetos a la contingencia. Varían a través del espacio y el tiempo, cambiando con las diferentes culturas humanas en diferentes épocas y diferentes lugares. Nuestras teorías se conectan con nuestros conceptos y palabras, claro es, pero la conexión también se da en dirección contraria, cuando nuestros conceptos y nuestras palabras se guían por nuestras mejores teorías actuales.

El segundo paso en la solución de nuestro dilema consiste en cambiar nuestro enfoque, pasando de los organismos vivientes al proceso que *produce* los organismos y otros fenómenos vivientes. El proceso generador es primario y sus productos son secundarios, puesto que el proceso proporciona una explicación unificada de los diversos productos. La comprensión de cómo los organismos y otros entes vivientes realmente llegan a existir y existen es la clave para comprender lo que son.

Yo creo que el proceso de la adaptación flexible es la forma primaria de la vida.⁹ Esta propuesta la defiende aquí, no sobre la base de que la adaptación flexi-

Review of Earth and Planetary Sciences, 23: 215-249, 1995; N. W. Pirie, “On Recognizing Life”, en D. I. Rohlfling y A. I. Oparin (comps.), *Molecular Evolution: Prebiological and Biological*, Plenum Press, Nueva York, 1972, pp. 67-76.

⁷ A. G. Cairns-Smith, *Seven Clues to the Origin of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985; M. Eigen, *Steps toward Life*, Oxford University Press, Oxford, 1992.

⁸ J. Maynard Smith, *The Theory of Evolution*, Penguin, Nueva York, 1975.

⁹ M. A. Bedau *et al.*, “A Comparison of Evolutionary Activity in Artificial Systems and in the Bio-

ble sea una condición necesaria y suficiente para la existencia de los organismos vivientes (no lo es), ni de que se ajuste a nuestro actual concepto de la vida o al significado actual de la palabra “vida” (acaso no lo haga), sino sobre la base de que proporciona la mejor explicación unificada de los fenómenos de la vida. Se debe juzgar a las teorías de la vida en parte por su éxito en resolver los enigmas básicos de la vida. Aquí mi preocupación específica es cómo la adaptación flexible soluciona cuatro de estos enigmas. No propongo una teoría de la vida completa y final, y tampoco soluciones definitivas a los cuatro enigmas. Pero sí muestro que la adaptación flexible proporciona buenas explicaciones de estos enigmas.

¿Podría otra teoría explicar los cuatro enigmas también? Es fácil imaginársela, es fácil suponer que podría solucionarlos; no es tan fácil sustentarla con evidencias reales. La teoría de la vida como adaptación flexible no elimina automáticamente las teorías rivales. Una teoría diferente que pudiera proporcionar una explicación tan adecuada de los enigmas sería una que habría que tomar en cuenta. Aquí no pretendo demostrar la imposibilidad de que pudiera haber teorías rivales verosímiles, sino establecer los criterios que tendrían que satisfacer para que se las pudiera tomar en serio.

LA TEORÍA DE LA VIDA COMO ADAPTACIÓN FLEXIBLE

Yo planteo que un proceso evolutivo automático y continuamente creativo de adaptación a los medios cambiantes es la forma de vida primaria. Mi planteamiento en términos generales se adapta al espíritu de las definiciones genéticas de la vida;¹⁰ en la literatura existen varias propuestas similares.¹¹ Desde mi perspectiva, lo que distingue a la vida es la forma en que la evolución automáticamente crea y vuelve a crear estrategias apropiadas para adaptarse a los cambios en los contextos locales.

La noción de la conveniencia que implica la adaptación flexible debe entenderse teleológicamente. Una respuesta es apropiada sólo si promueve y adelanta el logro de las metas y propósitos intrínsecos de un ente adaptativo, cuando esas metas y propósitos consisten mínimamente en sobrevivir y, más generalmente,

sphere”, en P. Husbands e I. Harvey (comps.), *Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life ECAL 97*, MIT Press/Bradford Books, Cambridge, 1997.

¹⁰ C. Langton, “Artificial Life”, en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, Reading, 1989, pp. 1-47.

¹¹ A. G. Cairns-Smith, *op. cit.*; M. Eigen, *op. cit.*; J. Maynard Smith, *op. cit.*

en florecer. Por ejemplo, si se raja la concha de una almeja, una respuesta inapropiada sería que los tejidos blandos de la almeja se derramaran por la rajadura, y una respuesta apropiada sería que la concha se reparara. En cambio, aunque el agua al fluir por una ladera automáticamente se “adapta” a la topografía local, el agua no posee metas o propósitos intrínsecos, y el fluir por una ladera no ayuda al logro de tales metas o propósitos. De manera similar, un termostato no tiene metas o propósitos intrínsecos, de manera que sus “respuestas adaptativas” a los cambios de temperatura locales pueden considerarse apropiados sólo en relación con las metas y propósitos extrínsecos que *nosotros* tenemos al usar esos artefactos. Estas nociones teleológicas de las metas y propósitos intrínsecos son ciertamente controvertidos, y no pretendo exponer aquí mis soluciones al respecto.¹² Confío en que su conexión con la noción de la adaptación sea lo suficientemente clara en el caso presente.

Mi propuesta es que el hilo que unifica la diversidad de la vida es la *flexibilidad* de este proceso de la producción de adaptaciones —su continua e indefinidamente creativa producción de nuevos tipos de respuestas adaptativas a los nuevos retos y oportunidades para la adaptación—. Una carrera armamentista biológica¹³ es un ejemplo sencillo de la adaptación flexible. En cambio, la respuesta de un termostato a la temperatura ambiental no es “flexible” en un sentido pertinente, porque es la misma respuesta “de siempre” a los cambios de temperatura “de siempre”. Puesto que el proceso de la adaptación flexible involucra tipos de retos a la adaptación y de oportunidades para la adaptación significativamente nuevos, los retos y oportunidades que no pueden anticiparse por los organismos incitan en ellos una gama abierta de respuestas apropiadas. Las expresiones como “evolución abierta”¹⁴ o “novedad perpetua”¹⁵ a veces se han utilizado para describir este proceso.

La adaptación flexible no debe identificarse con la selección natural. Para empezar, la selección natural no es necesaria para la adaptación flexible. Otros

¹² J. Maynard Smith y E. Szathmáry, *The Major Transition in Evolution*, W. H. Freeman, Nueva York, 1995; C. Sagan, s. v. “Life”, *The New Encyclopædia Britannica*, 15ª ed., Encyclopædia Britannica Inc., Chicago, 1998, pp. 964-981 [capítulo xxiii en esta edición]; M. A. Bedau, “Against Mentalism in Teleology”, *American Philosophical Quarterly*, 27: 61-70, 1990.

¹³ M. A. Bedau, “Can Biological Teleology Be Naturalized?”, *The Journal of Philosophy*, 88: 647-655, 1991.

¹⁴ M. A. Bedau, “Where’s the Good in Teleology?”, *Philosophy and Phenomenological Research*, 52: 310, 1992; R. Dawkins y J. R. Krebs, “Arms Race between and within Species”, *Proceedings of the Royal Society of London*, 205: 372, 1978.

¹⁵ K. Lindgren, “Evolutionary Phenomena in Simple Dynamics”, en C. Langton *et al.* (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, p. 184.

mecanismos adaptativos, como la selección lamarckiana o el aprendizaje hebbiano, pueden producir la adaptación flexible. Luego, la selección natural no es suficiente para la adaptación flexible. La adaptación flexible es la continua producción de significativas y nuevas tácticas adaptativas. En cambio, la dinámica de la selección natural con frecuencia se estabiliza a la larga, con el resultado de que las adaptaciones significativamente nuevas dejan de producirse. Aunque continuamente ocurren nuevas mutaciones, en el mejor de los casos sólo producen variantes no significativamente diferentes de adaptaciones conocidas. Así, la selección natural sólo produce la adaptación flexible cuando es continuamente creativa. Pero la adaptación no puede ser continuamente creativa si el cambio medioambiental no ocurre continuamente. Una forma de generar el cambio ambiental continuo se da cuando la evolución propia del sistema continuamente modifica los criterios selectivos o la función selectiva,¹⁶ acaso mediante algún mecanismo de este tipo: los organismos en el sistema evolutivo interactúan mediante su comportamiento. El medio ambiente de cada organismo consiste en gran parte de sus interacciones con otros organismos. Por lo tanto, si un organismo desarrolla evolutivamente un comportamiento adaptativo innovador, tal cosa cambia el medio ambiente de los organismos vecinos. El cambio ambiental a su vez causa que los organismos vecinos desarrollen evolutivamente sus propios comportamientos adaptativos nuevos y esto finalmente cambia el medio ambiente de ese mismo organismo. El efecto neto es que la evolución adaptativa de la población continuamente impulsa su propia adaptación.

Debo señalar la diferencia entre una capacidad y su forma de ejercerse, porque yo sostengo que la vida implica el *ejercicio* de la adaptación flexible, no sólo la capacidad para ejercerla. Un sistema que experimenta la adaptación flexible no se adapta en cada momento, desde luego; la adaptación ocurre de manera intermitente. Pero los periodos de calma entre los sucesos adaptativos son transitorios; tras todo periodo de calma aparecen nuevos sucesos adaptativos. Si un sistema que *puede* experimentar la adaptación flexible nunca lo *hace*, entonces, desde mi punto de vista, *podría* estar vivo, pero jamás lo *está*.

Probablemente el rasgo más controvertido de mi teoría de la vida es la afirmación de que la adaptación flexible no simplemente *produce* entes vivientes: las formas de vida *primarias* son precisamente los sistemas que se adaptan flexiblemente. Otros entes vivientes están vivos en virtud de tener una relación apropiada con un sistema adaptativo flexible; son formas de vida *secundarias*. Los diversos

¹⁶ T. Ray, "An Approach to The Synthesis of Life", en C. Langton *et al.* (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 371-408.

tipos de entes vivientes (los organismos, los órganos, las células, etc.) tienen diferentes tipos de relaciones con el sistema adaptativo que los abastece y del cual al fin y al cabo se deriva su vida. En general, estas relaciones son las formas en que un sistema adaptativo flexible crea y sustenta al ente. Así, en forma general, mi teoría de la vida se puede definir de esta manera:

X es un ente viviente si

1) *X es un sistema adaptativo flexible, o*

2) *X se explica en la forma correcta por un sistema adaptativo flexible.*

El efecto de esta definición es que infiere la forma de vida primaria de los sistemas adaptativos flexibles.

Según esta definición, los organismos vivientes individuales, los órganos, las células y todos los demás entes vivientes están vivos porque un sistema adaptativo flexible los explica en la forma correcta. Pero la definición no especifica cuáles tipos de explicaciones son las “correctas”. Las explicaciones típicamente implican la forma en que los entes se crean y sustentan, pero no está claro si esto siempre es verdad. Además, algunas formas de generar y de sustentar los entes claramente *no* son lo que esta definición entiende por ello; por ejemplo, la forma en que la gente crea y sustenta los automóviles y los tiraderos de basura, la forma en que las arañas crean y sustentan sus telas de araña y los castores sus diques. Creo yo que estos detalles habrán de solucionarse en el futuro por alguna teoría que logre explicar los fenómenos vivientes; aquí no estoy proponiendo una teoría final ni completa. Al afirmar que el proceso de la adaptación flexible constituye el factor explicativo medular que subyace en los diversos fenómenos de la vida y los unifica, la definición anterior delinea las categorías centrales que se tendrán que utilizar en una definición final, y propone las demarcaciones del terreno en que hay que buscar tal definición. Mi propósito no es dar una definición en particular, sino preparar el escenario para una que se habrá de producir en el futuro.

Una importante virtud de la teoría de la vida como adaptación flexible es su explicación unificada de los signos distintivos de la vida que según Mayr son esenciales. Según esta teoría, tales propiedades, al parecer heterogéneas, deben coexistir en la naturaleza. Si la vida consiste en los sistemas adaptativos flexibles y los entes que generan y sustentan, deberíamos esperar que la vida implique el funcionamiento de la selección natural, produciendo una organización adaptativa compleja en los organismos conectados históricamente que poseen programas genéticos evolucionados. Además, la variación aleatoria y la contingencia históri-

ca en la adaptación flexible explican por qué los fenómenos vivientes son especialmente impredecibles e involucran a individuos singulares y variables. Finalmente, si la adaptación flexible se produce por un proceso ramificado que incluye el nacimiento, la reproducción y la muerte de los individuos, tal como el proceso de la selección natural, entonces podemos entender por qué daría origen a muy diversos fenómenos cualitativos caracterizados por accidentes congelados; por ejemplo, las macromoléculas químicamente singulares. El carácter natural de todas estas explicaciones respalda la teoría de la vida como adaptación flexible.

Otra consideración a favor de la teoría es su respuesta natural a los cuestionamientos potenciales. Por ejemplo, las mulas, el último ejemplar viviente de una especie que está a punto de extinguirse, y los animales castrados, todos están vivos, pero en virtud de su infertilidad estos entes no desempeñan un papel en la adaptación flexible de su linaje. Sin embargo, los organismos infértiles sólo existen porque están conectados con otros organismos fértiles que *sí* tienen un papel activo en una biosfera adaptativa flexible, de manera que quedan incluidos en mi teoría.

Alguien podría objetar que la adaptación flexible de un sistema en evolución no posee la forma lógica correcta para constituir la naturaleza de la vida. Los organismos individuales son los entes vivientes paradigmáticos y una población de organismos en evolución pertenece a una categoría lógica diferente a la de un organismo individual. Entonces, uno podría pensar que la vida no puede consistir en una propiedad de nivel colectivo como la adaptación flexible de una población. Ahora bien, los organismos individuales y las poblaciones de organismos pertenecen a diferentes categorías, ciertamente, pero los fenómenos de una categoría pueden explicar los fenómenos de otras categorías. La teoría de la vida como adaptación flexible niega que los organismos individuales sean las formas de vida primarias, pero lo hace consciente y deliberadamente, sobre la base del convencimiento de que el proceso de la adaptación flexible representa nuestra mejor esperanza para unificar y explicar los fenómenos de la vida. Si la mejor explicación de la vida viola algunos de nuestros paradigmas actualmente predominantes sobre la vida, mucho lo sentimos por esos paradigmas.

La posibilidad de una ecología que hubiera alcanzado un estado de equilibrio estable y detenido su adaptación para siempre sería un reto más directo a mi teoría. Al fin y al cabo, los organismos en ecosistemas de ese tipo, los llamados ecosistemas "clímax", ciertamente estarían vivos, pero su ecosistema ya no experimentaría la adaptación flexible, de manera que tales organismos al parecer quedarían fuera de mi teoría. No obstante, los ecosistemas clímax no solo se originan me-

dian­te un pro­ce­so de adap­ta­ción flexi­ble, si­no que sus pe­rí­o­dos de calma son tran­si­to­rios. Ésta es, por lo me­nos, la hipóte­sis de­trás de la teo­ría de la vida co­mo adap­ta­ción flexi­ble. Si la hipóte­sis es falsa y si re­sul­ta que los eco­sis­te­mas clí­max si­m­ple­men­te no mue­stran la adap­ta­ción flexi­ble, en­ton­ces la teo­ría de la vida co­mo adap­ta­ción flexi­ble tam­bién se­ría falsa. El que la hipóte­sis sea ver­da­de­ra o no es una cues­ción em­pí­rica. Mi teo­ría no im­plica que la hipóte­sis sea ana­lítica­men­te ver­da­de­ra (no lo es), y tam­poco que sea co­no­ci­ble *a priori* (no lo es), si­no sólo que la na­tu­ra­leza de la vida de he­cho es la adap­ta­ción flexi­ble. Si­en­do la na­tu­ra­leza de la vida, es una pro­pie­dad esen­cial de la vida y por lo tan­to es nece­sa­ria­men­te vá­li­da, pe­ro es una nece­si­dad que de­ter­mi­na­mos *a posteriori* me­dian­te la cie­ncia em­pí­rica.

Es fá­cil *imaginar* cir­cun­stan­cias que con­tra­di­cen mi ex­pli­ca­ción de la vida. Nada nos im­pide, co­mo a Boden,¹⁷ nu­trir la fan­ta­sía cie­n­tífica de la exis­ten­cia de es­pe­cies que ja­más evo­lu­cio­nan y que ja­más se adap­tan. Has­ta don­de yo lo pue­da sa­ber, tal co­sa es po­si­ble; es de­cir, “e­pis­té­micamente” po­si­ble, co­mo Kripke¹⁸ aca­so di­ría. Así co­mo tam­bién es po­si­ble que sólo ha­ya ha­bi­do y sólo ha­brá ja­más un so­lo or­ga­nis­mo vi­vien­te. Y tam­bién que to­dos los or­ga­nis­mos se ha­yan cre­a­do en sie­te dí­as por una de­i­dad om­ni­po­ten­te y om­ni­sci­en­te. Pe­ro es­tas fan­ta­sías es­o son —só­lo fan­ta­sías, qui­me­ras que no se re­la­cio­nan con la ver­da­de­ra na­tu­ra­leza de cual­quier for­ma de vida que pue­dié­ra­mos de­scu­brir o sin­te­ti­zar—. Yo afir­mo —*a posteriori*, cla­ro es, pe­ro con ra­zón, es­toy se­gu­ro— que to­dos los or­ga­nis­mos vi­vien­tes en cual­quier lu­gar del uni­ver­so de­fi­ni­ti­va­men­te de­ri­van su exis­ten­cia y sus as­pec­tos ca­rac­te­rís­ti­ca­men­te vi­ta­les del he­cho de que tie­nen el ti­po a­pro­pia­do de co­ne­xión ex­pli­ca­ti­va con un sis­te­ma que ex­pe­ri­men­ta con­ti­nu­a­men­te la adap­ta­ción flexi­ble.

¿Exis­ten con­tra­e­jem­plos de sis­te­mas adap­ta­ti­vos flexi­bles no vi­vien­tes? Los vi­rus se adap­tan para con­tra­re­star to­dos nue­stros es­fuer­zos a fin de erra­di­car­los —el vi­rus del si­da evo­lu­cio­na con sor­pren­den­te ra­pi­dez— y los vi­rus son e­jem­plos clási­cos de en­tes que exis­ten a me­dio ca­mi­no en­tre la vida y la no vida. Tie­nen aún me­nos apa­ren­cia de vida los di­mi­nu­tos cris­ta­les de arcilla del lo­do, pe­ro al pa­re­cer tie­nen la flexi­bi­li­dad para adap­tar­se y evo­lu­cio­nar me­dian­te la se­lec­ción na­tu­ral.¹⁹ Lo mis­mo se ve en las re­des au­to­ca­ta­líticas de las es­pe­cies quí­mi­cas,²⁰ pe­ro co­mún­men­te no se pi­en­sa que mue­stren in­di­cios de vida las po­

¹⁷ M. A. Boden, “Is Metabolism Necessary?”, *British Journal for the Philosophy of Science*, 50 (2): 231-248, 1999.

¹⁸ S. Kripke, *Naming and Necessity*, Harvard University Press, Cambridge, 1980.

¹⁹ A. G. Cairns-Smith, *op. cit.*; C. Sagan, *op. cit.*

²⁰ S. Kripke, *op. cit.*

blaciones evolutivas de cristales o sustancias químicas. Son ejemplos aún más extremos las actividades mentales humanas de los individuos y las actividades intelectuales, sociales y económicas de las colectividades humanas; todas parecen ser capacidades flexibles y abiertas para adaptarse a circunstancias impredeciblemente cambiantes, pero a ninguna comúnmente se la calificaría de viviente. Los seres humanos generan actividades económicas e intelectuales, pero no se puede decir que están vivos los sistemas económicos o intelectuales mismos, aunque sean evolutivos. Sin embargo, yo no propongo la adaptación flexible como una explicación de nuestro concepto actual de la vida, de manera que no me preocupan mayormente las clasificaciones no intuitivas. Estos casos contra-intuitivos no socavan el hecho de que la adaptación flexible sea nuestra mejor explicación de los fenómenos de la vida. Si la vida es adaptación flexible, entonces los virus y las poblaciones de cristales de arcilla, las redes autocatalíticas químicas y los sistemas humanos intelectuales y económicos merecen todos que se les considere vivientes si muestran la adaptación flexible. El lenguaje ordinario acaso refleje cierta presión lingüística que de esto se deriva, ya que hablamos de la vitalidad de tales sistemas (aunque esto sólo sea una metáfora, claro). Si lo que buscamos es entender la verdadera naturaleza de los fenómenos de la vida, debemos estar abiertos a la posibilidad de que la vida sea bastante diferente de lo que ahora suponemos que es.

CUATRO ENIGMAS Y LAS SOLUCIONES PROPUESTAS

Se puede evaluar una teoría de la vida con base en qué tan bien logra resolver enigmas persistentes sobre la vida. Aquí presento en forma resumida mi actual lista de enigmas, junto con la solución que implica la teoría de la vida como adaptación flexible.

Enigma 1: ¿Cómo se relacionan las diferentes formas de vida en los distintos niveles de la jerarquía biológica?

Solución: La vida tiene que existir en muchos niveles de organización. Los distintos niveles involucran formas de vida diferentes pero relacionadas.

Enigma 2: ¿Es continua o dicotómica la distinción entre la vida y la no vida?

Solución: Varios continuos y dicotomías separan la vida y la no vida, pero la distinción primaria es la continua.

Enigma 3: ¿Involucra la esencia de la vida la materia o la forma?

Solución: La vida es esencialmente una cierta forma de proceso. La flexibilidad de esta forma de proceso determina que el proceso sea no computacional, pero una simulación computacional de la vida puede crear la vida real.

Enigma 4: ¿Se relacionan intrínsecamente la vida y la mente?

Solución: La vida y la mente son expresiones del mismo tipo de proceso, esencialmente.

Estos enigmas son controvertidos y sutiles. Una teoría convincente no sólo debe resolverlos; también debe explicar por qué surgen en primer lugar. La teoría de la adaptación flexible hace todo esto.

Niveles y dependencias

Los fenómenos vivientes se ubican en una compleja jerarquía de niveles —la llamaré *jerarquía vital*—. Incluso a grandes rasgos es posible distinguir por lo menos ocho niveles en la jerarquía vital: los ecosistemas, que consisten en comunidades, que consisten en poblaciones, que consisten en organismos, que consisten en sistemas orgánicos (sistema inmunológico, sistema cardiovascular), que consisten en órganos (corazón, riñón, bazo), que consisten en tejidos, que consisten en células. Los elementos que se encuentran en un nivel de la jerarquía constituyen los elementos en los niveles superiores. Por ejemplo, una población individual consiste en un linaje de organismos que han evolucionado a través del tiempo. Los organismos individuales nacen, viven un tiempo y luego mueren. Vistos en su totalidad a lo largo del tiempo, estos individuos constituyen la población evolutiva. La jerarquía vital plantea dos tipos básicos de preguntas sobre la naturaleza de la vida. Primero, podemos preguntar si hay o no una tendencia inherente a formar jerarquías en los sistemas vivientes. ¿Por qué son tan prominentes las jerarquías en los fenómenos de la vida? La segunda pregunta (en realidad, serie de preguntas) tiene que ver con las relaciones entre los tipos de vida que aparecen a través de la jerarquía vital. ¿Existen diferentes tipos de vida en los niveles diferentes, y si es así, cómo se relacionan? ¿En qué son similares y en qué diferentes? ¿Cuáles vienen antes y cuáles después? ¿Cuál es la forma primaria de la vida? A Haldane²¹ y a Mayr²² estas preguntas les interesan especialmente, aunque ninguno de los dos tiene las respuestas definitivas a ellas.

²¹ J. B. S. Haldane, *Adventures of a Biologist*, MacMillan, Nueva York, 1937.

²² E. Mayr, *op. cit.*

La teoría de la vida como adaptación flexible se sitúa en un marco de dos niveles con formas de vida diferentes pero conectadas. El primer nivel consiste en la forma de vida primaria: los sistemas adaptativos flexibles mismos. Un sistema adaptativo flexible es toda una población evolutiva de organismos, o todo un ecosistema evolutivo con muchas poblaciones o, finalmente, toda una biosfera evolutiva con muchos sistemas que interactúan entre sí. En el segundo nivel, los entes generados y sustentados adecuadamente por este sistema adaptativo flexible se ramifican como formas de vida secundarias diferentes, pero conectadas. Estas formas de vida secundarias son los organismos, los órganos y las células. Por lo tanto, la idea de que varias formas de vida se encuentran en varios niveles de la jerarquía biológica se deriva de la estructura misma de la teoría de la vida.

Hay que señalar que la noción misma de un sistema adaptativo flexible implica numerosos niveles simultáneos de actividad. La evolución adaptativa involucra la interacción entre los fenómenos en diversos niveles, incluidos por lo menos los genes, los organismos individuales y las poblaciones, de manera que el proceso implica un sistema que sea activo en los niveles macro, meso y micro. Por lo tanto, la teoría de la vida como adaptación flexible explica por qué la vida involucra numerosos niveles de fenómenos vivientes. Los agentes que constituyen una población adaptativa flexible no en todos los casos están ellos mismos vivos. El tipo más sencillo de sistema adaptativo flexible es al parecer algo así como una red autocatalítica de especies químicas, tal como aquellas que hipotéticamente se involucran en el origen de la vida,²³ y no es posible atribuirle la vida a las especies químicas que constituyen esos sistemas adaptativos flexibles. Sin embargo, los agentes en la mayoría de las poblaciones adaptativas flexibles están vivos; los organismos constituyen el caso paradigmático de esto.

La adaptación flexible también podría explicar de otra manera, a la vez más indirecta y mucho más controvertida, el hecho de que haya una jerarquía vital. Todos sabemos que los organismos se componen de partes que funcionan para asegurar la supervivencia y reproducción del organismo, y que en algunos casos las partes mismas poseen una compleja estructura jerárquica (pensemos en el sistema inmunológico o el cerebro). La progresión de la evolución en nuestra biosfera muestra un notable incremento general en la complejidad, desde la vida unicelular procariota hasta las formas de vida celulares eucariotas con núcleo y diversas estructuras citoplásmicas, y luego hasta las formas de vida compuestas de una multiplicidad de células y sucesivamente hasta las criaturas vertebradas

²³ S. Kripke, *op. cit.*; J. B. S. Haldane, *op. cit.*

con grandes cuerpos y sofisticadas capacidades de procesamiento sensorial, y finalmente criaturas extremadamente inteligentes que utilizan el lenguaje y desarrollan tecnologías complejas. Tales evidencias concuerdan con la hipótesis de que los procesos evolutivos abiertos inherentemente tienden a crear criaturas con una organización funcional cada vez más compleja. Así como la flecha de la entropía en la segunda ley de la termodinámica indica que la entropía de todos los sistemas físicos generalmente tiende a aumentar con el tiempo, la hipótesis de la flecha de la complejidad indica que la organización funcional compleja de los más complejos productos de los sistemas evolutivos abiertos generalmente tiende a aumentar con el tiempo. Sin embargo, la hipótesis de la flecha de la complejidad está lejos de haberse comprobado. Algunos biólogos la aceptan, pero muchos la ven con escepticismo.²⁴ No pretendo solucionar esta controversia aquí y ahora. De hecho, yo pienso que no tenemos pruebas convincentes a favor o en contra de la hipótesis actualmente.²⁵ Lo que aquí quiero señalar es que *si* la hipótesis de la flecha de la complejidad es correcta, entonces los sistemas adaptativos flexibles tienden inherentemente a producir entes con una compleja estructura jerárquica, y por lo tanto la teoría de la vida como adaptación flexible ofrece una profunda explicación de la jerarquía vital.

Ya sea que la hipótesis de la flecha de la complejidad se compruebe o no, la teoría de la vida como adaptación flexible soluciona el enigma sobre los niveles de la vida en una forma que proporciona una explicación natural de la razón por la que este enigma surge en primer lugar.

El continuo o la dicotomía

¿Podrían los entes ser más o menos vivientes? En la reflexión profunda sobre la vida pronto surge la cuestión de si la vida es una propiedad booleana (blanca o negra), como parece serlo a primera vista, o si es una propiedad de un continuo, con una gama de muchos tonos grises. El sentido común se inclina hacia la perspectiva booleana: un conejo es un ente viviente y una roca no, y tiene poco sentido pensar que un ente se encuentre entre ambos estados, siendo parcialmente

²⁴ Véase, por ejemplo, S. J. Gould, *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History*, W. W. Norton, Nueva York, 1989; S. J. Gould, *Full House: The Spread of Excellence from Plato to Darwin*, Harmony Books, Nueva York, 1996; J. Maynard Smith y E. Szathmáry, *op. cit.*; D. W. McShea, "Metazoan Complexity and Evolution: Is There a Trend?", *Evolution*, 50: 477-492, 1996; véanse también muchos de los capítulos de S. J. Gould, *Full House*, *op. cit.*

²⁵ M. H. Nitecki, *Evolutionary Progress*, The University of Chicago Press, Chicago, 1988.

viviente pero no totalmente. Pero diversos casos extremos ponen a prueba el punto de vista del sentido común; por ejemplo, los virus que no pueden replicarse por sí mismos, y las esporas o la esperma congelada que permanecen latentes indefinidamente pero luego “vuelven a la vida” cuando las condiciones cambian adecuadamente. Además, todos estamos de acuerdo en que las formas de vida originales de alguna manera emergieron de una sopa química prebiótica, y tal cosa sugiere que en principio hay muy poca diferencia, si la hay, entre la vida y la no vida. Para muchos esto implica que existe un continuo innegable compuesto de entes vivientes y entes no vivientes.²⁶ ¿Pero es esto verdad?

Si la vida se ve como adaptación flexible, entonces la distinción vida/no vida más importante implica un continuo, ya que la actividad de la adaptación flexible misma se realiza gradualmente. Sistemas diferentes muestran diferentes grados de adaptación flexible, y el nivel de la adaptación flexible de un sistema dado puede fluctuar a lo largo del tiempo. El nivel de adaptación flexible de un sistema puede caer fluidamente a nada o ascender fluidamente a partir de nada. Es obvio que el nivel de adaptación flexible de los sistemas en evolución puede ascender o caer continuamente. De hecho, existen métodos para cuantificar los diversos aspectos del nivel de la adaptación flexible de un sistema en evolución,²⁷ y esto permite que se compare directamente la dinámica de la adaptación flexible de los sistemas artificiales y naturales. Por lo tanto, si vemos la vida como adaptación flexible, entonces estar vivo es una cuestión de grado. Además de preguntar si algo está vivo, también podemos preguntar sobre la extensión de su vida; de hecho, su vida podría variar en más de una dimensión.

Es posible, desde luego, definir varias importantes distinciones booleanas con base en el continuo de la adaptación flexible. Una distinción natural es si el nivel de adaptación flexible de un sistema es o no positivo; esta dicotomía indica si un sistema está o no vivo. Pero hay que admitir que cualquier distinción booleana de este cariz implica un elemento inconfundible de arbitrariedad; también podríamos, y con igual justificación, enfocar si el nivel de adaptación flexible de un sistema es superior a 17, o a 3.14159. Además, tales dicotomías se definirían a partir de un continuo de niveles de adaptación flexible anterior y más fundamen-

²⁶ A. G. Cairns-Smith, *op. cit.*; S. Kripke, *op. cit.*; C. Barlow, *Evolution Extended: Biological Debates about the Meanings of Life*, MIT Press, Cambridge, 1995; M. A. Bedau, “Philosophical Content and Method in Artificial Life”, en T. W. Bynam y J. H. Moor (comps.), *The Digital Phoenix: How Computers are Changing Philosophy*, Blackwell, Nueva York, 1997, pp. 135-152.

²⁷ D. C. Dennett, *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meaning of Life*, Simon & Schuster, Nueva York, 1995; C. Emmeche, *The Garden in the Machine: The Emerging Science of Artificial Life*, Princeton University Press, Princeton, 1994.

tal; el nivel de adaptación flexible de un sistema podría estar arbitrariamente próximo al punto límite elegido por nosotros. Por lo tanto, el continuo es la verdad que subyace en las dicotomías cuya definición se puede hacer gracias a él.

Hay una dimensión pragmática en la cuestión de si la vida es o no básicamente booleana o continua. Si cuantificamos el nivel de la adaptación flexible de un sistema en la forma que Norman Packard y yo lo hemos propuesto,²⁸ entonces uno necesitaría una cierta cantidad de datos y por lo tanto una cierta cantidad de tiempo para reunir los datos, para determinar (hasta cierto nivel de confianza estadística) si un sistema tiene un nivel dado de adaptación flexible. Así, respecto a un sistema que muestra muy poca adaptación flexible, tomaría mucho tiempo recabar los datos suficientes como para diferenciarlo de la hipótesis nula. Pero en ese mismo periodo de tiempo, el sistema podría agotar algún recurso esencial y perecer. Por lo tanto, podría ser imposible en la práctica detectar la adaptación flexible más abajo de cierto nivel en un cierto periodo de tiempo, y esto crearía una dicotomía que separaría la vida detectable de todo lo demás. Aun así, esto no debilitaría el hecho de que en principio un continuo subyace en esta dicotomía.

La teoría de que la vida es la adaptación flexible, por lo menos como yo la entiendo, sostiene que la vida es la *actividad* de la adaptación flexible, no simplemente la capacidad de la adaptación flexible. Pero la existencia de esta capacidad es más básica que la forma en que se ejercita; la capacidad es anterior a su práctica. De manera que podríamos preguntar si esta capacidad es una propiedad booleana. Incluso si no sabemos exactamente por qué un sistema puede poseer esta capacidad, podría parecernos que un sistema la posee o carece de ella; podría parecernos que un sistema puede experimentar la evolución abierta o no puede hacerlo. Pero la verdad parece ser más complicada. La adaptación flexible es el proceso de producir tipos *significativamente nuevos* de respuestas adaptativas a tipos *significativamente nuevos* de retos y oportunidades adaptativas. Puesto que es dudoso que haya una clara división entre los retos y las respuestas que son *significativamente nuevos* y los que no lo son, la propiedad de poseer la capacidad de la vida parecería ser una cuestión de grado.

Hasta aquí hemos enfocado el sistema adaptativo mismo, lo cual es correcto si la adaptación flexible es la forma de vida primaria, como yo he estado insistiendo. Pero otros entes, tales como los organismos individuales, los órganos individuales y las células individuales, también están vivos, aunque sólo sea secunda-

²⁸ D. C. Dennett, *op. cit.*; C. Emmeche, *The Garden in the Machine, op. cit.*; M. A. Bedau y N. H. Packard, "Measurement of Evolutionary Activity, Teleology, and Life", en C. G. Langton *et al.* (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992; M. A. Bedau *et al.*, *op. cit.*

riamente, y debemos preguntarnos si su vida es o no una cuestión de grado. Intuitivamente, uno pensaría que un piojo o un paramecio no están menos vivos que una vaca o un ser humano; similarmente, mi corazón no está menos vivo que el de un piojo, y una de las células de mi cuerpo no está menos viva que una de las de un piojo. La teoría de la vida como adaptación flexible sustenta estas intuiciones. Esta teoría les atribuye diferentes formas de vida derivativas a las entidades que poseen una conexión adecuada con un sistema adaptativo flexible, y por lo general es un asunto igualmente determinante y dicotómico para los seres humanos y para los piojos el hecho de que estas conexiones prevalezcan o no. Cuando un ente definitivamente satisface o no satisface las condiciones de la vida derivativa, está definitivamente vivo o no lo está. Pero no hay que olvidar los conocidos casos extremos, tales como los virus, el esperma congelado y las esporas latentes, aunque hay que advertir que éstos son precisamente los casos en que la conexión con el sistema adaptativo flexible no sigue la norma. La forma derivativa de la reproducción de los virus hace que su participación en el sistema adaptativo flexible sea menos autónoma que la de otros organismos. El esperma congelado y las esporas latentes se han desconectado del sistema adaptativo flexible, pero cuando se restablece la conexión el esperma y las esporas “vuelven a la vida”. De esta manera, la teoría de la vida como adaptación flexible ofrece una explicación natural de la razón por la cual los casos extremos *son* casos extremos.

Si la teoría de la vida como adaptación flexible es correcta, entonces tanto las gradaciones de la continuidad como las divisiones de la dicotomía separan a los entes vivientes de los entes no vivientes. Dada tal complejidad, no es sorprendente que nos deje perplejos la cuestión de si hay o no una continuidad entre la vida y la no vida.

La materia o la forma

El surgimiento del campo de la vida artificial ha puesto en primer plano una serie de preguntas sobre el papel que juegan la materia y la forma en la vida.²⁹ Por un lado, ciertas macromoléculas basadas en el carbón desempeñan una función crucial en los procesos vitales de todos los entes vivientes conocidos; por otro lado, la vida es al parecer un tipo de proceso más que un tipo de sustancia. Por añadidura, gran parte de la investigación de la vida artificial parece presuponer que es

²⁹ E. Sober, *op. cit.*; J. Maynard Smith, *op. cit.*; M. A. Bedau, “Philosophical Content and Method in Artificial Life”, *op. cit.*; M. A. Bedau, “The Nature of Life”, en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Nueva York, 1996, pp. 332-358.

posible producir la vida en una computadora adecuadamente programada.³⁰ Esto da pie a varias preguntas: ¿se relaciona la esencia de la vida con el material de que está compuesta una cosa o con la forma en que ese material se ordena? Si se relaciona con ésta, ¿es una forma estática o es un proceso? Si es un proceso, ¿es éste un proceso computacional? ¿Es una propiedad funcional la propiedad de estar vivo? ¿Es posible producir esta propiedad en una lista indefinidamente larga de diferentes sustratos materiales? ¿Podría alguna vez ser una producción de vida, es decir, estar literalmente viva una simulación computacional de un proceso viviente?

La adaptación flexible es un tipo de proceso, no un tipo de sustancia. Aunque este proceso no puede ocurrir a menos que se produzca en algún tipo de sustancia, y aunque simplemente no pueda producirse en *cualquier* tipo de sustancia, parece bastante extensa la gama de sustancias en las que se *puede* producir. Al fin y al cabo, incluso los sistemas económicos o intelectuales pueden mostrar una adaptación flexible. De manera que la adaptación flexible es realizable en múltiples formas. Lo esencial en la adaptación flexible es la *forma* de las interacciones entre los componentes, no la sustancia de que se componen éstos. Así, lo que determina si algo es un caso del proceso de la adaptación flexible es si se presenta o no el tipo adecuado de estructura funcional. En otras palabras, el proceso de la adaptación flexible tiene una definición funcional.

Claro que la teoría de la vida como adaptación flexible incluye las formas de vida secundarias, las cuales se delinearían por una versión más específica de la segunda cláusula de la definición que dimos antes. Pero las cláusulas en tal definición también tendrían que especificar las condiciones o relaciones estructurales, causales o funcionales, y estas condiciones o relaciones también tendrían que ser realizables de múltiples maneras. Así que la teoría de la vida como adaptación flexible entiende la vida totalmente como una propiedad funcional. Por ende, según esta teoría, el funcionalismo capta la verdad sobre la vida. Además, no hay una razón evidente para que la estructura funcional especificada en la teoría no pudiera producirse en un medio computacional adecuadamente estructurado. Si esto es así, entonces una “simulación” computacional de la vida en principio podría crear un ente real, literalmente viviente.

En este punto surge una seductora confusión. Al afirmar que la adaptación flexible puede producirse en un medio computacional, yo *no* afirmo que el proceso de la adaptación flexible se corresponda con un algoritmo fijo. Esto lo impide

³⁰ Para una buena discusión sobre este asunto véase C. Emmeche, “Life as an Abstract Phenomenon: Is Artificial Life Possible?”, en F. Varela y P. Bourgine, *Towards a Practice of Autonomous Systems*, MIT Press/Bradford Books, Cambridge, 1992, pp. 466-474.

la *flexibilidad* de la adaptación flexible —su habilidad para responder apropiadamente a una gama de contingencias abierta e imprevisible—. El caso del llamado “problema del marco” en la inteligencia artificial ilustra el problema.³¹ Uno podría intentar incorporar un proceso flexible en un algoritmo fijo, de manera similar a como la inteligencia artificial tradicional utiliza la heurística, los sistemas expertos y demás técnicas. Pero el hecho empírico es que estos algoritmos no responden flexiblemente a una diversidad abierta de contingencias.³² Por la misma razón, un algoritmo fijo no puede captar la flexibilidad de la adaptación flexible.

Sin embargo, no hay una razón evidente para que el proceso de la adaptación flexible no pueda realizarse en un medio computacional, siempre que haya un mecanismo adecuadamente flexible para cambiar los algoritmos involucrados. Es ésta una de las primeras enseñanzas importantes del campo de la vida artificial. Los procesos vitales típicamente son flexibles; pensemos en el metabolismo o en el proceso de la adaptación mismo. La adaptación exitosa depende de la habilidad para explorar un número apropiado de alternativas evolutivas viables; demasiadas o insuficientes alternativas pueden hacer que la adaptación sea difícil, incluso imposible. En otras palabras, el éxito requiere encontrar el equilibrio entre las diversas y divergentes exigencias de la “creatividad” (el intentar nuevas alternativas) y de la “memoria” (la retención de lo que ha mostrado ser exitoso). Además, al cambiar el contexto de la evolución, el equilibrio adecuado entre la creatividad y la memoria puede desplazarse en una forma que se resista a una formulación precisa, sin excepciones. Aun así, los modelos de vida artificial pueden mostrar una flexibilidad fluida en la manera en que equilibran la creatividad y la novedad,³³ ya que el comportamiento algorítmico subyacente se forma y vuelve a formar flexiblemente a través del proceso de la evolución. El aspecto clave detrás de la dinámica vital fluida producida por los algoritmos genéticos³⁴ y otros mecanismos flexibles que subyacen en los modelos de vida artificial, es su arquitectura de “abajo-arriba”.³⁵ La dinámica fluida es el efecto emergente del macronivel de una competencia, que depende del contexto, por influir en una población de entes de

³¹ Véase, por ejemplo, H. H. Pattee, “Simulations, Realization, and Theories of Life”, en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, Redwood City, 1989, pp. 63-78.

³² Véase, por ejemplo, E. T. Olson, “The Ontological Basis of Strong Artificial Life”, *Artificial Life*, 3: 29-30, 1997; Z. W. Pylyshyn, *The Robots Dilemma: The Frame Problem in Artificial Intelligence*, Ablex, Norwood, 1987; H. Dreyfus, *What Computers Cannot Do*, Harper & Row, Nueva York, 1979.

³³ D. F. Hofstadter, “Waking up from the Boolean Dream, Or, Subcognition as Computation”, en *Metamagical Dilemmas: Questing for the Essence of Mind and Pattern*, Basic Books, Nueva York, 1985, pp. 631-665.

³⁴ K. Lindgren, *op. cit.*

³⁵ J. Maynard Smith, *op. cit.*

micronivel en el modelo. Los modelos de micronivel son objetos algorítmicos precisos y fijos, claro, pero sus dinámicas fluidas emergentes de macronivel no lo son. Por esta razón, la adaptación flexible puede realizarse como un efecto emergente no algorítmico de macro nivel, de un proceso algorítmico de micronivel. Aunque la realización múltiple de la adaptación flexible implica que la vida tiene una definición funcional, la flexibilidad de esta estructura funcional implica que el proceso de la vida no es un algoritmo fijo. En otro lugar yo he llamado *funcionalismo emergente*³⁶ a esta forma especial de funcionalismo.

Este planteamiento identifica tres factores que nutren el enigma sobre si la vida depende de la forma o de la materia. Uno consiste en la sutileza inherente de la relación entre la forma y la materia, relación que el funcionalismo implica; lo esencial en la adaptación flexible es una cierta forma de proceso, pero esta forma de proceso no puede existir sin estar incorporado en alguna materia. Indudablemente la influencia de la biología molecular, nutrida por el célebre descubrimiento de la doble hélice de ADN y recientemente enriquecida por la clonación de un borrego adulto, también contribuye al enigma de si la vida es forma o materia. El tercer factor del enigma es la errónea identificación del funcionalismo y del computacionalismo. Todo esto ayuda a explicar por qué el enigma de si la vida involucra la forma o la materia se debate con tanto ahínco.

La vida y la mente

El cuarto enigma es si existe o no una conexión intrínseca ente la vida y la mente. Las plantas, las bacterias, los insectos y los mamíferos, por ejemplo, son sensibles de diversas maneras al medio ambiente y esta sensibilidad al medio ambiente afecta de diversas maneras su comportamiento; además, estos organismos se comunican entre sí de diversas maneras. Por lo tanto, diversos tipos de lo que uno podría llamar, en sentido amplio, capacidades “mentales”, existen a través de la biosfera. Por añadidura, la relativa sofisticación de estas capacidades mentales parece corresponderse con y explicar la relativa sofisticación de esas formas de vida. Así que es natural preguntarse si hay una conexión profunda entre la vida y la mente. El proceso de la evolución establece una conexión genealógica entre la vida y la mente, claro, pero la vida y la mente podrían estar unificadas mucho más profundamente. Por ejemplo, la vida y la mente estarían notablemente unificadas si tie-

³⁶ D. R. Hofstadter, *op. cit.*

ne razón Beer³⁷ al decir que “el comportamiento adaptativo, la [...] habilidad de lidiar con el complejo mundo dinámico e impredecible en que vivimos, es, de hecho, fundamental [en la inteligencia misma]”.³⁸ Puesto que todas las formas de vida tienen que lidiar de alguna manera con un complejo mundo dinámico e impredecible, acaso esta flexibilidad adaptativa conecta inseparablemente la vida y la mente. Uno de los enigmas básicos de la vida es saber cómo se conectan, si es que se conectan, la vida y la mente.

Si las capacidades mentales son adaptaciones producidas por el proceso de la evolución, entonces la teoría de la vida como adaptación flexible implica que la vida misma produce las capacidades mentales. Hay quienes ven la evolución de la mente como un accidente histórico totalmente impredecible;³⁹ o como una adaptación a la complejidad ambiental;⁴⁰ o como una consecuencia casi inevitable del proceso evolutivo —lo que Dennett llama “un movimiento obligado”—.⁴¹ Todos estos puntos de vista están de acuerdo en que la mente es en el mejor de los casos tan sólo una adaptación entre muchas otras. Por lo tanto, este planteamiento implica que hay una conexión genealógica entre la vida y la mente, pero que esta conexión no es única, por lo que la vida y la mente no tienen una unión intrínseca.

Esto contrasta con la idea de Aristóteles de que hay una profunda unidad entre la vida y la mente. Code y Moravski⁴² explican de la siguiente manera la posición de Aristóteles: “En el caso de un ente viviente [...] su actividad ‘psicológica’ es el ejercicio [...] de las diversas capacidades y potencialidades [...] asignadas a su alma [...] *en un ente viviente, su actividad natural/física es solamente su actividad psicológica*”.⁴³

³⁷ R. D. Beer, *Intelligence as Adaptive Behavior: An Experiment in Computational Neuroethology*, Academic Press, Boston, 1990, p. 11.

³⁸ Véase también A. Farmer y A. Belin, *op. cit.*; M. A. Bedau, “Emergent Models of Supple Dynamics in Life and Mind”, *Brain and Cognition*, 34: 5-27, 1997; D. R. Beer, *op. cit.*; J. R. Anderson, *The Adaptive Character of Thought*, Erlbaum, Hillsdale, 1990; A. Clark, *Being There: Putting Brain, Body, and World together Again*, MIT Press, Cambridge, 1997.

³⁹ R. Bagley y J. D. Farmer, “Spontaneous Emergence of a Metabolism”, en C. G. Langton *et al.* (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 93-140; J. D. Farmer, S. A. Kauffman y N. H. Packard, “Autocatalytic Replication of Polymers”, en J. D. Farmer y B. Wendroff (comps.), *Evolution, Games, and Learning: Models for Adaptation for Machines and Nature*, North Holland Physics Publishing, Amsterdam, 1986, pp. 50-67.

⁴⁰ H. R. Maturana y J. F. Varela, *The Tree of Knowledge: The Biological Roots of Human Understanding*, Shambhala, Boston, 1987.

⁴¹ C. Barlow, *op. cit.*

⁴² D. Parisi, N. Nolfi y F. Cecconi, “Learning, Behavior, and Evolution”, en F. Varela y P. Bourguine (comps.), *Towards a Practice of Autonomous Systems*, MIT Press/Bradford Books, Cambridge, 1992, p. 130.

⁴³ Las cursivas son mías.

Sobre la base de la teoría de la vida como adaptación flexible, también se puede establecer una conexión directa entre la vida y la mente, pues uno puede ver la mente como una expresión esencialmente de la misma capacidad subyacente en la adaptación flexible. Se sabe bien que los patrones dinámicos que emergen entre nuestros estados mentales son especialmente difíciles de describir y explicar. Una lista abierta de excepciones no eliminables afecta la descripción de los patrones mentales, y por esta razón a estos patrones a veces se les califica de “fluidos”⁴⁴ o “suaves”.⁴⁵ Pero hay diferentes tipos de fluidez y suavidad. Fodor⁴⁶ y otros han enfatizado el punto funcionalista de que la suavidad puede resultar del mal funcionamiento de los procesos que implementan los fenómenos mentales. Horgan y Tienson⁴⁷ han enfatizado la suavidad que resulta de los resultados indeterminados de la competencia entre una gama potencialmente abierta de deseos conflictivos. Pero lo que aquí resulta más relevante es la existencia de esas excepciones específicas a la regla que reflejan nuestra *habilidad para actuar adecuadamente* ante una gama abierta de contingencias contextuales. Estas excepciones ocurren cuando nos adaptamos *apropiadamente* a las contingencias. Algunos autores concluyen que esta capacidad flexible para el comportamiento adaptativo es el aspecto definitorio de la inteligencia o la mente.⁴⁸

La perspectiva cuasiaristotélica entiende la mente esencialmente como la expresión de una forma de adaptación flexible. La selección natural no se involucra necesariamente, ya que la selección lamarckiana o algún otro proceso adaptativo podría funcionar aquí. Más bien, dejando de lado la mecánica de la adaptación, mi argumento es que el proceso de poseer una mente se parece mucho al proceso de estar vivo. Por tanto, la teoría de la vida como adaptación flexible se alía naturalmente con la teoría de la mente como adaptación flexible. Así como la esencia de la vida es el proceso que genera los fenómenos de la vida, la esencia de la mente es el proceso que genera el comportamiento inteligente. Si tanto la vida como la mente son el producto básicamente del mismo proceso de adaptación flexible, entonces la mente no sólo es una adaptación entre muchas otras. Más bien, un

⁴⁴ Z. W. Pylyshyn, *op. cit.*

⁴⁵ D. Parisi, N. Nolfi y F. Cecconi, *op. cit.*

⁴⁶ J. A. Fodor, *Representations*, MIT Press/Bradford Books, Cambridge, 1981.

⁴⁷ T. Horgan y J. Tienson, “Representation without Rules”, *Philosophical Topics*, 17: 147-174, 1989.

⁴⁸ M. H. Nitecki, *Evolutionary Progress*, The University of Chicago Press, Chicago, 1988; D. R. Hofstadter, *op. cit.*; H. J. Holland, “Escaping Brittleness: The Possibilities of General-Purpose Learning Algorithms Applied to Parallel Rule-Based Systems”, en R. S. Michalski, J. G. Carbonell y T. M. Mitchell (comps.), *Machine Learning II*, Morgan Kaufmann, Los Aires, California, 1986; M. A. Bedau, “Philosophical Content and Method in Artificial Life”, *op. cit.*; J. R. Anderson, *op. cit.*; A. Clark, *op. cit.*; T. Horgan y J. Tienson, “Soft Laws”, *Midwest Studies in Philosophy*, 17: 256-279, 1990.

aspecto esencial de la mente se involucra en la explicación de todas las demás adaptaciones, de manera que la vida y la mente no podrían menos que coexistir. Ambas muestran la misma fuerte continuidad⁴⁹ que se caracteriza por el hecho de que ambas muestran el patrón abstracto de la adaptación flexible. Desde la perspectiva de la teoría de la vida como adaptación flexible y de la idea cuasiaristotélica de la mente, no nos debe sorprender que la gente crea que la vida y la mente están profundamente conectadas.

Una solución completa del enigma de la conexión entre la vida y la mente también tendría que explicar por qué esta conexión hoy se ignora ampliamente, especialmente por muchos filósofos. La teoría de la vida como adaptación flexible, conjuntamente con la idea cuasiaristotélica de la mente, pueden echarle la culpa a Descartes. La filosofía contemporánea de la mente es una disciplina muy influenciada por Descartes. Descartes en su época rechazó el entonces ortodoxo marco escolástico aristotélico, a favor de la idea de que las sustancias vivientes no tienen una conexión esencial con las sustancias mentales (salvo la conexión causal no mediada que unifica la mente y el cuerpo de cada individuo). Descartes enfocó la naturaleza intrínseca y particular de las sustancias vivientes y las sustancias mentales, ignorando los procesos que las habían creado y sustentado, y concluyendo que las sustancias vivientes eran mecanismos puramente materiales, a pesar de que las sustancias mentales constituyen la conciencia esencialmente inmaterial y espiritual. Hoy en día, incluso la filosofía contemporánea de la mente que rechaza el dualismo cartesiano del cuerpo y la mente, suele entender la conciencia como la esencia de la mente, desentendiéndose como Descartes de la forma en que se producen las sustancias vivientes y mentales. Un testimonio de la persistente influencia de Descartes es la actual renuencia a abordar el enigma de cómo se conectan la vida y la mente.

CUESTIONES ABIERTAS Y CONCLUSIONES

Yo no ofrezco una teoría de la vida final y completa, y tampoco una solución final y completa de los cuatro enigmas de la vida, pero sí defendiendo la forma general de la teoría de la vida como adaptación flexible. Mi defensa consiste en indicar las prometedoras e iluminadoras soluciones a los cuatro enigmas sobre la vida.

⁴⁹ J. A. Fodor, *op. cit.*

Esta defensa enfoca tres cuestiones abiertas. La primera es la de determinar cuál es, finalmente, la mejor explicación de los fenómenos y enigmas predominantes relacionados con la vida. Aunque la adaptación flexible proporciona una buena explicación de estas cuestiones, deja el campo abierto para que otras teorías proporcionen mejores explicaciones. Nuestra comprensión final sobre lo que la vida realmente es dependerá de cuál teoría finalmente proporcione las mejores explicaciones.

Cuando intentamos describir exactamente cómo la adaptación flexible explica este problema, surgen otras dos cuestiones. Por una parte, esta teoría no es más clara que la noción misma de la adaptación flexible, y todavía queda mucho por aprender sobre la adaptación flexible. Por ejemplo, ningún modelo evolutivo ha mostrado sin ambigüedades el tipo de adaptación flexible en continuo aumento que es evidente en la biosfera,⁵⁰ ni siquiera esos modelos con criterios de selección impredeciblemente cambiantes y un espacio infinito de posibilidades genéticas, tales como el *Echo* de John Holland,⁵¹ las estrategias evolutivas de infinitos dilemas del prisionero de John Lingren⁵² y la *Tierra* de Tom Ray.⁵³ El problema parece deberse a que ningún modelo existente crea un espacio accesible para los nuevos tipos de innovaciones adaptativas que se desarrolle continuamente. La síntesis de tan sólo un caso de adaptación flexible continuamente creciente haría avanzar profundamente nuestra comprensión de este proceso. La tarea de producir y certificar tal modelo es responsabilidad del campo de la vida artificial. Si la vida es la adaptación flexible, descubrir este modelo es uno de los retos actuales más urgentes para la vida artificial.

Finalmente, incluso si nuestra comprensión de la adaptación flexible fuera total, todavía tendríamos que determinar cómo utilizarla de la mejor manera para definir la vida. Por ejemplo, necesitamos determinar los diferentes modos en que las diferentes formas de vida pueden explicarse mediante un sistema adaptativo flexible. Estos detalles habrán de remplazar la expresión “explicarse de la manera correcta” en la definición que dimos anteriormente. También necesitamos decidir qué importancia darle a los diferentes mecanismos que producen la adaptación flexible. La selección natural es uno de esos mecanismos, pero hay muchos otros (la selección lamarckiana, etc.). Una vez que hayamos delineado

⁵⁰ M. A. Bedau, “Three Illustrations of Artificial Life’s Working Hypothesis”, en W. Banschaf y F. Eckman (comps.), *Evolution and Biocomputation — Computational Models of Evolution*, Springer, Berlín, 1995; M. A. Bedau y N. H. Packard, *op. cit.*

⁵¹ K. Lindgren, *op. cit.*

⁵² M. A. Bedau y N. H. Packard, *op. cit.*

⁵³ R. Dawkins y J. R. Krebs, *op. cit.*

todos estos mecanismos, estaremos frente a una opción: ¿produce cualquier mecanismo la forma primaria de vida representada por los sistemas adaptativos flexibles? ¿Sólo la produce la selección natural? La manera de resolver esta cuestión, finalmente, será mediante la determinación de cuál opción proporciona la comprensión más iluminadora de los fenómenos y los enigmas relacionados con la vida.

Yo pretendo que esta discusión establezca dos conclusiones principales sobre la teoría de la vida. La primera es metodológica: la búsqueda de una teoría de la vida será más productiva si enfoca la mejor explicación de la vida e incluye los profundos y persistentes enigmas de la vida. Esta metodología nos liberará de muchas preocupaciones tradicionales que han sido causadas por nuestras presuposiciones actuales sobre la vida, incluida la preocupación respecto a las condiciones necesarias y suficientes para todos los organismos vivientes y sólo para éstos. Mi segunda conclusión es fundamental: la teoría de la vida merece nuestra seria reflexión. Es indudable que la teoría genera tensiones en relación con nuestras presuposiciones actuales sobre la vida, pero esto no es un defecto de la teoría. Las teorías rivales serían propuestas creíbles sólo si explicaran los fenómenos vivientes y solucionararan los cuatro enigmas por lo menos tan bien como lo hace la adaptación flexible.

BIBLIOGRAFÍA

- Anderson, J. R., *The Adaptive Character of Thought*, Erlbaum, Hillsdale, 1990.
- Bagley, R., y J. D. Farmer, "Spontaneous Emergence of a Metabolism", en C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 93-140.
- Barlow, C., *Evolution Extended: Biological Debates about the Meanings of Life*, MIT Press, Cambridge, 1995.
- Bedau, M. A., "Against Mentalism in Teleology", *American Philosophical Quarterly*, 27: 61-70, 1990.
- , "Can Biological Teleology be Naturalized", *The Journal of Philosophy*, 88: 647-655, 1991.
- , "Emergent Models of Supple Dynamics in Life and Mind", *Brain and Cognition*, 34: 5-27, 1997.
- , "Is Metabolism Necessary?", *British Journal for the Philosophy of Science*, 50 (2): 231-248, 1999.

- Bedau, M. A., "Philosophical Content and Method in Artificial Life", en T. W. Bynam y J. H. Moor (comps.), *The Digital Phoenix: How Computers are Changing Philosophy*, Blackwell, Nueva York, 1997, pp. 135-152.
- , "The Nature of Life", en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Nueva York, 1996, pp. 332-358.
- , "Three Illustrations of Artificial Life's Working Hypothesis", en W. Banschaf y F. Eckman (comps.), *Evolution and Biocomputation — Computational Models of Evolution*, Springer, Berlín, 1995.
- , "Where's the Good in Teleology?", *Philosophy and Phenomenological Research*, 52: 310, 1992.
- Bedau, M. A., E. Snyder, C. T. Brown y N. H. Packard, "A Comparison of Evolutionary Activity in Artificial Systems and in the Biosphere", en P. Husbands e I. Harvey (comps.), *Proceedings of the Fourth European Conference on Artificial Life ECAL 97*, MIT Press/Bradford Books, Cambridge, 1997.
- Bedau, M. A. y N. H. Packard, "Measurement of Evolutionary Activity, Teleology, and Life", en C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992.
- Bedau, M. A., E. Snyder, C. T. Brown y N. H. Packard, "A Classification of Long-Term Evolutionary Activity in Artificial Systems and in Biosphere", en C. Adami, R. Belew, H. Kitano y C. Taylor (comps.), *Artificial Life VI*, MIT Press, Cambridge, 1998.
- Beer, R. D., *Intelligence as Adaptive Behavior: An Experiment in Computational Neuroethology*, Academic Press, Boston, 1990.
- Cairns-Smith, A. G., *Seven Clues to the Origin of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985. [Versión en español: *Siete pistas sobre el origen de la vida. Una historia científica en clave detectivesca*, trad. de E. Soto Rodríguez y C. Sese Benito, Alianza, Madrid, 1990.]
- Chyba, C. F., y G. D. McDonald, "The Origin of Life in the Solar System: Current Issues", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 215-249, 1995.
- Clark, A., *Being There: Putting Brain, Body, and World together Again*, MIT Press, Cambridge, 1997.
- Code, A., y J. Moravcsik, "Explaining Various Forms Living", en M. C. Nussbaum y A. O. Rorty (comps.), *Essays on Aristotle's De Anima*, Clarendon Press, Oxford, 1992, pp. 129-145.
- Dawkins, R., y J. R. Krebs, "Arms Race between and within Species", *Proceedings of the Royal Society of London*, 205: 372, 1978.
- Dennett, D. C., *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meaning of Life*, Simon & Schuster, Nueva York, 1995. [Versión en español: *La peligrosa idea de Darwin: evolu-*

- ción y significados de la vida*, trad. de C. Pera Blanco-Morales, Galaxia Gutenberg, España, 1990.]
- Dreyfus, H., *What Computers Cannot Do*, Harper & Row, Nueva York, 1979.
- Eigen, M., *Steps toward Life*, Oxford University Press, Oxford, 1992.
- Emmeche, C., "Life as an Abstract Phenomenon: Is Artificial Life Possible?", en F. Varela, y P. Bourguine, *Towards a Practice of Autonomous Systems*, MIT Press/Bradford Books, Cambridge, 1992, pp. 466-474.
- , *The Garden in the Machine: The Emerging Science of Artificial Life*, Princeton University Press, Princeton, 1994. [Versión en español: *Vida simulada en el ordenador: la nueva ciencia de la inteligencia artificial*, trad. de C. de la Reta, Gedisa, Barcelona, 1998.]
- Farmer, D., y A. Belin, "Artificial Life: The Coming Evolution", en C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 815-840.
- Farmer, J. D., S. A. Kauffman y N. H. Packard, "Autocatalytic Replication of Polymers", en J. D. Farmer y B. Wendroff (comps.), *Evolution, Games, and Learning: Models for Adaptation for Machines and Nature*, North Holland Physics Publishing, Ámsterdam, 1986, pp. 50-67.
- Fodor, J. A., *Representations*, MIT Press/Bradford Books, Cambridge, 1981.
- Godfrey-Smith, P., *Complexity and the Function of Mind in Nature*, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- , "Spender and Dewey on Life and Mind", en R. Books y P. Maes (comps.), *Artificial Life IV*, MIT Press/Bradford Books, Cambridge, 1994, pp. 80-89.
- Gould, S. J., *Full House: The Spread of Excellence from Plato to Darwin*, Harmony Books, Nueva York, 1996.
- , *Wonderful Life: The Burgess Shale and the Nature of History*, W. W. Norton, Nueva York, 1989. [Versión en español: *La vida maravillosa: Burgess Shale y la naturaleza de la historia*, trad. de J. Ros, Crítica, Barcelona, 2008.]
- Haldane, J. B. S., *Adventures of a Biologist*, MacMillan, Nueva York, 1937.
- Hofstadter, D. R., "Waking up from the Boolean Dream, Or, Subcognition as Computation", en *Metamagical Dilemmas: Questing for the Essence of Mind and Pattern*, Basic Books, Nueva York, 1985, pp. 631-665.
- Holland, H. J., "Escaping Brittleness: The Possibilities of General-Purpose Learning Algorithms Applied to Parallel Rule-Based Systems", en J. G. Carbonell y T. M. Mitchell (comps.), *Machine Learning II*, Morgan Kaufmann, Los Aires, California, 1986.
- Horgan, T., y J. Tienson, "Representation without Rules", *Philosophical Topics*, 17: 147-174, 1989.

- Horgan, T., y J. Tienson, "Soft Laws", *Midwest Studies in Philosophy*, 17: 256-279, 1990.
- Kripke, S., *Naming and Necessity*, Harvard University Press, Cambridge, 1980.
- Langton, C., "Artificial Life", en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, Redwood City, 1989, pp. 1-47.
- Lindgren, K., "Evolutionary Phenomena in Simple Dynamics", en C. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer, y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, p. 184.
- Maturana, H. R., y F. J. Varela, *The Tree of Knowledge: The Biological Roots of Human Understanding*, Shambhala, Boston, 1987. [Versión en español: *El árbol del conocimiento: las bases biológicas del entendimiento humano*, Lumen, Buenos Aires, 2003.]
- Maynard Smith, J., *The Theory of Evolution*, Penguin, Nueva York, 1975.
- Maynard Smith, J., y E. Szathmari, *The Major Transition in Evolution*, W. H. Freeman, Nueva York, 1995.
- Mayr, E., *The Growth of Biological Thought*, Harvard University Press, Cambridge, 1982.
- McShea, D. W., "Metazoan Complexity and Evolution: Is There a Trend?", *Evolution*, 50: 477-492, 1996.
- Nitecki, M. H., *Evolutionary Progress*, The University of Chicago Press, Chicago, 1988.
- Olson, E. T., "The Ontological Basis of Strong Artificial Life", *Artificial Life*, 3: 29-30, 1997.
- Packard, N., "Intrinsic Adaptation in a Simple Model for Evolution", en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, Redwood City, 1989, pp. 141-155.
- Parisi, D., N. Nolfi y F. Cecconi, "Learning, Behavior, and Evolution", en F. Varela y P. Bourguin (comps.), *Towards a Practice of Autonomous Systems*, MIT Press/Bradford Books, Cambridge, 1992, p. 130.
- Pattee, H. H., "Simulations, Realization, and Theories of Life", en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, Redwood City, 1989, pp. 63-78.
- Pirie, N. W., "On Recognizing Life", en D. I. Rohlfs y A. I. Oparin (comps.), *Molecular Evolution: Prebiological and Biological*, Plenum Press, Nueva York, 1972, pp. 67-76.
- Pylyshyn, Z. W., *The Robots Dilemma: The Frame Problem in Artificial Intelligence*, Ablex, Norwood, 1987.
- Ray, T., "An Approach to The Synthesis of Life", en C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 371-408.
- Sagan, C., s. v. "Life", *The New Encyclopædia Britannica*, Encyclopædia Britannica, Inc., Chicago, 1998, pp. 964-981.
- Sober, E., "Learning from Functionalism—Prospects for Strong Artificial Life", *Artificial Life*, 2: 749-765, 1992.
- Taylor, C., "Fleshing Out", en C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 371-408.

BIBLIOGRAFÍA SUPLEMENTARIA SOBRE LA VIDA

Es extensa la bibliografía sobre el tema de la vida. Sin embargo, a veces resulta difícil localizar las obras, puesto que se encuentran desperdigadas en una amplia gama de fuentes interdisciplinarias. Teniendo en cuenta esto, nos hemos propuesto proporcionar a los lectores una lista de obras que complementen y amplíen el material citado en este libro. Éstas se agrupan de acuerdo con las cuatro partes del libro: como sucede con los capítulos de éste, muchas de las obras listadas seguidamente se relacionan con cuestiones que aparecen en más de una de las partes. La lista está lejos de ser exhaustiva, pero hemos intentado incluir en ella las obras que consideramos más importantes, más útiles y más accesibles.

DISCUSIONES CLÁSICAS SOBRE LA VIDA

- Ablondi, F., “Automata, Living and Non-Living: Descartes’ Mechanical Biology and His Criteria for Life”, *Biology and Philosophy*, 13 (2): 179-186, 1998.
- Allen, C., M. Bekoff y G. V. Lauder (comps.), *Nature’s Purposes: Analyses of Function and Design in Biology*, MIT Press, Cambridge, 1998.
- Bedau, M. A., y P. Humphreys (comps.), *Emergence: Contemporary Readings in Philosophy and Science*, MIT Press, Cambridge, 2008.
- Boden, M. A., *Mind as Machine: A History of Cognitive Science*, Oxford University Press, Oxford, 2006.
- Code, A., y J. Moravcsik, “Explaining Various Forms of Living”, en M. C. Nussbaum y A. O. Rorty (comps.), *Essays on Aristotle’s De Anima*, Clarendon Press, Oxford, 1992, pp. 129-145.
- Craver, C. F., y L. Darden, “Introduction: Mechanisms Then and Now”, *Studies in the History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 36 (2): 233-244, 2005.
- Des Chenes, D., *Spirits and Clocks: Machine and Organism in Descartes*, Cornell University Press, Ithaca, Nueva York / Londres, 2000.

- Dick, S. J., *Plurality of Worlds: The Origins of the Extraterrestrial Life Debate from Democritus to Kant*, Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
- Gánti, T., "Biogenesis Itself", *Journal of Theoretical Biology*, 187: 583-593, 1997.
- , "Organization of Chemical Reactions into Dividing and Metabolizing Units: The Chemotons", *Biosystems*, 7: 15-21, 1975.
- , *The Principles of Life*, con un comentario de J. Griesemer y E. Szathmáry, Oxford University Press, Nueva York, 2003.
- Ginsborg, H., "Kant on Understanding Organisms as Natural Purposes", en E. Watkins (comp.), *Kant and the Sciences*, Oxford University Press, Oxford, 2001, pp. 231-258.
- Gotthelf, A., y J. G. Lennox (comps.), *Philosophical Issues in Aristotle's Biology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1987.
- Haldane, J. B. S., "The Origin of Life", en J. D. Bernal, *The Origin of Life*, Weidenfeld & Nicolson, Londres, 1967, pp. 242-249.
- , "What is Life?", en J. B. S. Haldane, *Adventures of a Biologist*, Macmillan, Nueva York, 1937, pp. 49-64.
- , *What is Life?*, Boni and Gear, Nueva York, 1947.
- Hazen, R., *Genesis: The Scientific Quest for Life's Origin*, Joseph Henry Press, Washington, 2005.
- Matthews, G. B., "Aristotle on Life", en M. C. Nussbaum y A. O. Rorty (comps.), *Essays on Aristotle's De Anima*, Clarendon Press, Oxford, 1996, pp. 185-193.
- Mayr, E., *The Growth of Biological Thought. Diversity, Evolution and Inheritance*, Belknap Press, Cambridge, 1982.
- Nussbaum, M. C., y A. O. Rorty (comps.), *Essays on Aristotle's De Anima*, Clarendon Press, Oxford, 1992.
- Oparin, A. I., *Life: Its Nature, Origin, and Development*, Academic Press, Nueva York, 1961.
- Richards, R. J., *The Romantic Conception of Life: Science and Philosophy in the Age of Goethe*, The University of Chicago Press, Chicago, 2002.
- Sapp, J., *Genesis: The Evolution of Biology*, Oxford University Press, Oxford, 2003.
- Schrödinger, E., *What is Life? The Physical Aspect of the Living Cell*, Cambridge University Press, Cambridge, 1944.
- Shields, C., "The Meaning of Life", en C. Shields, *Order in Multiplicity*, Oxford University Press, Oxford, 1999, pp. 176-193.
- Waddington, C., *The Nature of Life*, George Allen and Unwin, Londres, 1961.

EL ORIGEN Y LA AMPLITUD DE LA VIDA NATURAL

- Alberti, A., "The Origin of the Genetic Code and Protein Synthesis", *Journal of Molecular Evolution*, 45 (4): 352-358, 1997.
- Bachmann, P., P. Luisi y J. Lang, "Autocatalytic Self-replicating Micelles as Models for Prebiotic Structures", *Nature*, 357: 57-59, 1992.
- Banfield, J. F., J. W. Moreau, C. S. Chan, S. A. Welch y B. Little, "Mineralogical Biosignatures and the Search for Life on Mars", *Astrobiology*, 1 (4): 447-465, 2001.
- Benner, S. A., y D. Hutter, "Phosphates, DNA, and the Search for Nonterran Life: A Second Generation Model for Genetic Molecules", *Bioorganic Chemistry*, 30: 62-80, 2002.
- Bradley, J. P., R. P. Harvey, H. Y. McSween, E. Gibson, K. Thomas-Keprta y H. Vali, "No 'Nanofossils' in Martian Meteorite", *Nature*, 390: 454-456, 1997.
- Cairns-Smith, A. G., *Genetic Takeover and the Mineral Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1982.
- Cairns-Smith, A. G., A. J. Hall y M. J. Russell, "Mineral Theories of the Origin of Life and an Iron Sulfide Example", *Origins of Life and the Evolution of the Biospheres*, 22: 161-180, 1992.
- Chyba, C. F., y G. D. McDonald, "The Origin of Life in the Solar System: Current Issues", *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 23: 215-249, 1995.
- Cleland, C. E., "Epistemological Issues in the Study of Microbial Life: Alternative Terran Biospheres?", *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 38 (4): 847-861, 2007.
- Cleland, C. E., y C. F. Chyba, "Defining 'Life' ", *Origins of Life and Evolution of the Biosphere*, 32 (4): 387-393, 2002.
- Crick, F., "The Origin of the Genetic Code", *Journal of Molecular Biology*, 38: 367-379, 1968.
- Cronin, J., y S. Chang, "Organic Matter in Meteorites: Molecular and Isotopic Analysis of the Murchison Meteorite", en J. M. Greenberg, C. X. Mendoza-Gómez y V. Pirronello (comps.), *The Chemistry of Life's Origin*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1993, pp. 205-258.
- Darling, D., *Are We Alone?*, Basic Books, Nueva York, 2001.
- Davies, P., *Are We Alone? Philosophical of the Discovery of Extraterrestrial Life*, Basic Books, Nueva York, 1955.

- Davies, P. C. W., S. A. Benner, C. E. Cleland, C. H. Lineweaver, C. P. McKay y F. Wolfe-Simon, "Signatures of a Shadow Biosphere", *Astrobiology*, 9 (2): 241-249, 2009.
- Davies, P. C. W., y C. H. Lineweaver, "Finding a Second Sample of Life on Earth", *Astrobiology*, 5 (2): 154-163, 2005.
- Deamer, D. W., "The First Living Systems: A Bioenergetic Perspective", *Microbiology and Molecular Biology Review*, 61 (2): 239-261, 1997.
- Des Marais, D., y M. Walter, "Astrobiology: Exploring the Origins, Evolution, and Distribution of Life", *Annual Review of Ecology and Systematics*, 30: 397-420, 1999.
- Di Giulio, M., "On the Origin of the Genetic Code", *Journal of Theoretical Biology*, 187: 573-581, 1997.
- Di Gregorio, B. E., G. V. Levin y P. A. Straat, *Mars, the Living Planet*, Frog Books, Berkeley, 1997.
- Dick, S. J., *The Biological Universe: The Twentieth Century Extraterrestrial Life Debate and the Limits of Science*, Cambridge University Press, Cambridge, 1996.
- Donaldson, D. J., H. Tervahattu, A. F. Tuck y V. Vaida, "Organic Aerosols and the Origin of Life: An Hypothesis", *Origins of Life and the Evolution of the Biosphere*, 34: 57-67, 2004.
- Duve, C. de, *Life Evolving: Molecules, Mind, and Meaning*, Oxford University Press, Nueva York, 2002.
- , *Vital Dust: Life as a Cosmic Imperative*, Basic Books, Nueva York, 1995.
- Dyson, F., "A Model for the Origin of Life", *Journal of Molecular Evolution*, 18: 344-350, 1982.
- , *Origins of Life*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- Eigen, M., "Self-Organization of Matter and the Evolution of Biological Macromolecules", *Naturwissenschaften*, 58: 465-523, 1971.
- , *Steps towards Life*, Oxford University Press, Oxford, 1992.
- Ferris, J., "Prebiotic Synthesis: Problems and Challenges", *Cold Spring Harbor Symposium on Quantitative Biology*, 55: 29-35, 1987.
- Fox, S., "How Did Life Begin", *Science*, 132: 200-208, 1960.
- Fry, I., *The Emergence of Life on Earth: A Historical and Scientific Overview*, Rutgers University Press, Londres, 2000.
- Gesteland, R. F., T. R. Cech y J. F. Atkins (comps.), *The RNA World*, Cold Spring Harbor, Nueva York, 1999.
- Gilbert, W., "Origin of Life: The RNA World", *Nature*, 319: 618, 1986.

- Golden, D. C., D. W. Ming, R. V. Morris, A. J. Brearley, H. V. Lauer, A. H. Treiman, M. E. Zolensky, C. S. Schwandt y G. E. Lofgren, "Evidence for Exclusively Inorganic Formation of Magnetite in Martian Meteorite ALH84001", *American Mineralogist*, 89: 681-695, 2004.
- Grinspoon, D., *Lonely Planets: The Natural Philosophy of Alien Life*, Harper Collins, Nueva York, 2004.
- Horgan, J., "In the Beginning", *Scientific American*, 114: 125, 1991.
- Irvine, W., "Extraterrestrial Organic Matter", *Origins of Life and the Evolution of the Biosphere*, 28: 365-383, 1998.
- Kamminga, H., "Life from Space. A History of Panspermia", *Vistas in Astronomy*, 26: 67-86, 1982.
- Kauffman, S. A., "Autocatalytic Sets of Proteins", *Journal of Theoretical Biology*, 119: 1-24, 1986.
- Kerr, R., "Requiem for Life on Mars? Support for Microbes Fades", *Science*, 282: 1398-1400, 1998.
- Klein, H., "The Viking Biological Experiments on Mars", *Icarus*, 34 (3): 666-674, 1978.
- Léger, A. J., M. Pirie y F. Marceau, "Search for Primitive Life on a Distant Planet: Relevance of O₂ and O₃ Detections", *Astronomy and Astrophysics*, 277: 309-313, 1993.
- Lison, S., "On The Crucial States in the Origin of Animated Matter", *Journal of Molecular Evolution*, 44: 1-8, 1977.
- Luisi, P., "Defining the Transition to Life: Self-replicating Bounded Structures and Chemical Autopoiesis", en W. Stein y F. Varela (comps.), *Thinking about Biology*, Addison-Wesley, Redwood City, 1993, pp. 3-23.
- Maurette, M., "Carbonaceous Micrometeorites and the Origin of Life", *Origins of Life and the Evolution of the Biosphere*, 28: 385-412, 1998.
- Maynard Smith, J., y E. Szathmáry, *The Origins of Life: From the Birth of Life to the Origins of Language*, Oxford University Press, Nueva York, 1999.
- McKay, C., "The Search for Life on Mars", *Origins of Life and the Evolution of the Biosphere*, 27: 263-289, 1997.
- McKay, D. S., E. K. Gibson, K. L. Thomas-Keppta, H. Vali, C. S. Romanek, S. J. Clemett, X. D. F. Chiller, C. R. Maechling y R. N. Zare, "Search for Past Life on Mars: Possible Relic Biogenic Activity in the Martian Meteorite ALH84001", *Science*, 273: 924-930, 1996.
- McNichol, J., "Historical Review: Primordial Soup, Fool's Gold, and Spontaneous Generation", *Biochemistry and Molecular Biology Education*, 36: 255-261, 2008.

- Miller, S. L., "A Production of Amino Acids under Possible Primitive Earth Conditions", *Science*, 117: 528-529, 1953.
- Miller, S., "The Prebiotic Synthesis of Organic Components as a Step toward the Origin of Life", en J. Schopf (comp.), *Major Events in the History of Life*, Jones & Bartlett Publishers, Boston, 1992, pp. 1-28.
- Miller, S., y J. L. Bada, "Submarine Hot Springs and the Origin of Life", *Nature*, 334: 155-176, 1988.
- Mojzsis, S., G. Arrhenius, K. McKeegan, T. Harrison, A. Nutman y C. Friend, "Evidence for Life on Earth Before 3800 Million Years Ago", *Nature*, 384: 55-59, 1996.
- Morowitz, H. J., "A Theory of Biochemical Organization, Metabolic Pathways, and Evolution", *Complexity*, 4 (6): 39-53, 1999.
- , *Beginnings of Cellular Life: Metabolism Recapitulates Biogenetics*, Yale University Press, New Haven, 1992.
- National Research Council, *The Limits of Organic Life in Planetary Systems*, National Academies Press, Washington, 2007.
- Nealson, K., y P. Conrad, "Life: Past, Present, and Future", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B*, 354: 1923-1939, 1999.
- Nealson, K., A. Tsapin y M. Storrie-Lombardi, "Searching for Life in the Universe: Unconventional Methods for an Unconventional Problem", *International Microbiology*, 5 (4): 223-230, 2002.
- O'Malley, M. A., y J. Dupré, "Metagenomics and Biological Ontology", *Studies in History and Philosophy of Biological and Biomedical Sciences*, 38: 834-846, 2007.
- , "Size Doesn't Matter: Towards a More Inclusive Philosophy of Biology", *Biology and Philosophy*, 22: 155-191, 2007.
- Orgel, L. E., "Prebiotic Chemistry and the Origin of the RNA World", *Critical Review in Biochemistry and Molecular Biology*, 39: 99-123, 2004.
- , "RNA Catalysis and the Origin of Life", *Journal of Theoretical Biology*, 123: 127-144, 1986.
- , "The Origins of Life on Earth", *Scientific American*, 271: 76-83, 1986.
- Rode, B., "Peptides and the Origin of Life", *Peptides*, 20: 773-786, 1999.
- Russell, M., A. Hall, A. G. Cairns-Smith y P. S. Braterman, "Submarine Hot Springs and the Origin of Life", *Nature*, 336: 117, 1988.
- Sagan, C., "The Origin of Life in a Cosmic Context", *Origins of Life and the Evolution of the Biosphere*, 5: 497-505, 1974.
- , "The Search for Extraterrestrial Life", *Scientific American*, 271: 92-99, 1944.

- Schneider, E., y J. Kay, "Life as a Manifestation of the Second Law of Thermodynamics", *Mathematical and Computer Modeling*, 19 (6-8): 25-48, 1994.
- Schulze-Makuch, D., y L. N. Irwin, *Life in the Universe: Expectations and Constraints*, Springer, Berlín, 2002.
- Seckbach, J. (comp.), *Life as We Know It*, vol. 10, Springer, Dordrecht, 2006.
- Segré, D., D. Ben-Eli, D. W. Deamer y D. Lancet, "The Lipid World", *Origins of Life and the Evolution of the Biosphere*, 31: 119-145, 2001.
- Segré, D., y D. Lancet, "Composing Life", *EMBO Reports*, 1: 217-222, 2000.
- Shapiro, R., *Origins: A Skeptic's Guide to the Creation of Life on Earth*, Bantam Books, Nueva York, 1986.
- , *Planetary Dream. The Quest to Discover Life beyond Earth*, Wiley & Sons, Nueva York, 1999.
- Sullivan, W. T., y J. A. Baross, *Planets and Life: The Emerging Science of Astrobiology*, Cambridge University Press, Cambridge, 2007.
- Wächtershäuser, G., "Groundworks for an Evolutionary Biochemistry: The Iron-Sulfur World", *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 58: 85-201, 1992.
- , "The Case for the Chemoautotrophic Origin of Life in an Iron-Sulfide World", *Origins of Life and the Evolution of the Biosphere*, 20 (2): 173-176, 1990.
- Ward, P., *Life as We Do Not Know It: The NASA Search for (and Synthesis of) Alien Life*, Viking, Nueva York, 2005.
- Ward, P. D., y D. Brownlee, *Rare Earth: Why Complex Life is Uncommon in the Universe*, Copernicus Book, Springer, Nueva York, 2000.
- Wharton, D., *Life at the Limits: Organisms in Extreme Environments*, Cambridge University Press, Cambridge, 2002.
- Whittet, D., "Is Extraterrestrial Organic Matter Relevant to the Origin of Life on Earth?", *Origins of Life and the Evolution of the Biosphere*, 27: 249-262, 1997.
- Willis, C., y J. Bada, *The Spark of Life: Darwin and the Primeval Soup*, Perseus Publishing, Cambridge, 2000.
- Woese, C. R., "A New Biology for a New Century", *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 86: 173-186, 2004.
- , "The Universal Ancestor", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 95: 6854-6859, 1998.
- Woese, G. E., y E. Fox, "Phylogenetic Structure of the Prokaryotic Domain: The Primary Kingdoms", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 74: 5088-5090, 1977.

Yockey, H., "Origin of Life on Earth and Shannon's Theory of Communication", *Computational Chemistry*, 24: 105-123, 2000.

LA VIDA ARTIFICIAL Y LA BIOLOGÍA SINTÉTICA

Adami, C., *Introduction to Artificial Life*, Springer, Nueva York, 1998.

Bagley, R., y J. D. Farmer, "Spontaneous Emergence of a Metabolism", en C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1990.

Baker, D., G. Church, J. Collins, D. Endy, J. Jacobson, J. Keasling y P. Modrich, "Engineering Life: Building a Fab for Biology", *Scientific American*, 294: 44-51, 2006.

Bedau, M. A., "Artificial Life: Organization, Adaptation, and Complexity from the Bottom Up", *Trends in Cognitive Science*, 7 (11): 505-512, 2003.

———, "Artificial Life", en M. Matthen y C. Stephen (comps.), *Handbook of the Philosophy of Biology*, Elsevier, Ámsterdam, 2007, pp. 585-603.

Bedau, M. A., J. S. McCaskill, N. H. Packard, S. Rasmussen, C. Adami, D. G. Green, T. Ikegami, K. Kaneko y T. S. Ray, "Open Problems in Artificial Life", *Artificial Life*, 6 (4): 363-376, 2000.

Bedau, M. A., y E. C. Parke (comps.), *The Prospect of Protocells: Social and Ethical Implications of Recreating Life*, MIT Press, Cambridge, 2009.

Beer, R. D., *Intelligence as Adaptive Behavior: An Experiment in Computational Neurotheology*, *Perspectives in Artificial Intelligence*, Academic Press, Boston, 1990.

Boden, M. A. (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Oxford, 1996.

Bonabeau, E., M. Dorigo y G. Theraulaz, *Swarm Intelligence: From Natural to Artificial Systems*, Santa Fe Institute Studies in the Sciences of Complexity, Oxford University Press, Oxford, 1999.

Bongard, J., V. Zykov y H. Lipson, "Resilient Machines through Continuous Self-modeling", *Science*, 314: 1118-1121, 2006.

Brooks, R. A., "Elephants Don't Play Chess", *Robotics and Autonomous Systems*, 6: 3-15, 1990.

———, "Intelligence without Representation", *Artificial Intelligence Journal*, 47: 139-160, 1991.

Brooks, R., *Flesh and Machines; How Robots Will Change Us*, Pantheon, Nueva York, 2002.

- Brooks, R., "The Relationship between Matter and Life", *Nature*, 409: 409-411, 2001.
- Chakrabarti, A., R. R. Breaker, G. E. Joyce y D. Deamer, "Production of RNA by a Polymerase Protein Encapsulated Within Phospholipid Vesicles", *Journal of Molecular Evolution*, 39: 555-559, 1994.
- Cho, M. K., D. Magnus, A. L. Caplan, D. McGee y The Ethics of Genomics Group, "Ethical Considerations in Synthesizing a Minimal Genome", *Science*, 286: 2087-2090, 1999.
- Clark, A., *Being There: Putting Brain, Body, and World together Again*, MIT Press, Cambridge, 1997.
- Deamer, D., "The First Living Systems: A Bioenergetic Perspective", *Microbiology and Molecular Biology Review*, 61 (2): 21-38, 1997.
- Eigen, M., "The Molecular Quasispecies", *Naturwissenschaften*, 58: 465-523, 1971.
- Elman, J., "Connectionism, Artificial Life, and Dynamical Systems: New Approaches to Old Questions", en W. Bechtel y G. Graham (comps.), *A Companion to Cognitive Science*, Basil Blackwell, Oxford, 1998, pp. 488-505.
- Emmeche, C., "Is Life a Multiverse Phenomenon?", en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life III*, Addison-Wesley, Redwood City, 1994, pp. 553-568.
- , "Life as an Abstract Phenomenon: Is artificial Life Possible?", en E. Varela y P. Bourguine (comps.), *Towards a Practice of Autonomous Systems*, MIT Press/Bradford Books, Cambridge, 1992, pp. 466-474.
- , *The Garden in the Machine*, Princeton University Press, Princeton, 1994.
- Farmer, J. D., y A. Belin, "Artificial Life: The Coming Evolution", en C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison Wesley, Redwood City, 1992, pp. 815-840.
- Farmer, J. D., A. S. Lapedes, N. Packard y B. Wendroff (comps.), *Evolution, Games, and Learning: Models for Adaptation in Machines and Nature*, North Holland Physics Publishing, Ámsterdam, 1986.
- Fontana, W., y L. Buss, "What Would Be Conserved If the Tape Were Played Again?", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 91: 757-761, 1994.
- Fraser, C. M., J. D. Gocayne, O. White, M. A. Adams, R. A. Clayton, R. D. Fleischmann, C. J. Bult, A. R. Kerlavage, G. Sutton, J. M. Kelley, J. L. Fritchman, J. F. Weidman, K. V. Small, M. Sandusky, J. Fuhrmann, D. Nguyen, T. R. Utterback, D. M. Saudeck, C. A. Phillips, J. M. Merrick, J. F. Tomb, B. A. Dougherty, K. F. Bott, P. C. Hu, T. S. Lucier, S. N. Peterson, H. O. Smith, C. A. Hutchison III y J. C. Venter, "The Minimal Gene Component of Mycoplasma Genitalium", *Science*, 270: 397-403, 1995.

- Gibson, D. G., G. A. Benders, C. Andrews-Pfannkoch, E. A. Denisova, H. Baden-Tilson, J. Zaveri, T. B. Stockwell, A. Brownley, D. W. Thomas, M. A. Algire, C. Merryman, L. Young, V. N. Noskov, J. I. Glass, J. C. Venter, C. A. Hutchison y H. O. Smith, "Complete Chemical Synthesis, Assembly, and Cloning of a *Mycoplasma Genitallum* Genome", *Science*, 319: 1215-1220, 2008.
- Gibson, D. G., J. I. Glass, C. Lartigue, V. N. Noskov, R. Y. Chuang, M. A. Algire, G. A. Benders, M. G. Montague, L. Ma, M. M. Moodie, C. Merryman, S. Vashee, R. Krishnakumar, N. Assad-García, C. Andrews-Pfannkoch, E. A. Denisova, L. Young, Z. Q. Qi, T. H. Segall-Shapiro, C. H. Calvey, P. P. Parmar, C. A. Hutchison III, H. O. Smith y J. C. Venter, "Creation of a Bacterial Cell Controlled by a Chemically Synthesized Genome", *Science*, 329: 52-56, 2010.
- Hanczyc, M. M., S. M. Fujikawa y J. W. Szostak, "Experimental Models of Primitive Cellular Components: Encapsulation, Growth, and Division", *Science*, 320: 618-622, 2003.
- Holland, J. H., *Adaptation in Natural and Artificial Systems; An Introductory Analysis with Applications to Biology, Control, and Artificial Intelligence*, MIT Press, Cambridge, 1992.
- , *Hidden Order: How Adaptation Builds Complexity*, Helix Books, Nueva York, 1995. [Versión en español: *El orden oculto*, trad. de E. Torres Alexander, Fondo de Cultura Económica, México, 2004.]
- Hutchison, C. A., S. N. Peterson, S. R. Gill, R. T. Cline, O. White, C. M. Fraser, H. O. Smith y J. C. Venter, "Global Transposon Mutagenesis and a Minimal *Mycoplasma* Genome", *Science*, 286: 2165-2169, 1999.
- Kaneko, K., *Life: An Introduction to Complex Systems Biology*, Springer, Berlín, 2006.
- Kauffman, S. A., *The Origins of Order: Self-organization and Selection in Evolution*, Oxford University Press, Nueva York, 1993.
- Keeley, B. L., "Evaluating Artificial Life and Artificial Organisms", *Artificial Life*, 5: 264-271, 1996.
- , "Artificial Life for Philosophers", *Philosophical Psychology*, 11 (2): 251-260, 1998.
- Korzeniewski, B., "Confrontation of the Cybernetic Definition of a Living Individual with the Real World", *Acta Biotheoretica*, 53 (1): 1-28, 2004.
- Landecker, H., "Culturing Life: How Cells Became Technologies", *Isis*, 102 (1): 149-150, 2011.
- Langton, C. G., "Artificial Life", en C. G. Langton (comp.), *Artificial Life*, Addison-Wesley, Redwood City, 1939, pp. 1-47.
- Langton, C. G., "Studying Artificial Life with Cellular Automata", *Physica*, 221: 120-149, 1986.

- Lartigue, C., J. L. Glass, N. Alperovich, P. Pieper, P. P. Parmar, C. A. Hutchison, H. O. Smith y J. C. Venter, "Genome Transplantation in Bacteria: Changing One Species to Another", *Science*, 317: 632-633, 2007.
- Lee, D. H., J. R. Granja y M. R. Ghadiri, "A Self-replicating Peptide", *Nature*, 332: 525-526, 1996.
- Lenski, R. E., C. Ofria, R. T. Pennock y C. Adami, "The Evolutionary Origin of Complex Features", *Nature*, 423: 139-144, 2003.
- Luisi, P. L., "Self-Reproduction of Micelles and Vesicles: Models for the Mechanisms of Life from the Perspective of Compartmented Chemistry", *Advances in Chemistry and Physics*, 92: 425-438, 1996.
- Maynard Smith, J., "Byte-Sized Evolution", *Nature*, 355: 772-773, 1992.
- Monnard, P. A., y D. Deamer, "Membrane Self-assembly Processes: Steps towards the First Cellular Life", *The Anatomical Record*, 263: 196-207, 2002.
- Morigaki, K., S. Dallavalle, P. Walde, S. Colonna y P. L. Luisi, "Autopoietic Self-reproduction of Chiral Fatty Acid Vesicles", *Journal of the American Chemical Society*, 119 (2): 292-301, 1997.
- Mouritsen, O. G., *Life — As a Matter of Fat: The Emerging Science of Lipidomics*, Springer, Berlín, 2005.
- Noireaux, V., y A. Libchaber, "A Vesicle Bioreactor as a Step towards an Artificial Cell Assembly", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101 (17): 669-674, 2004.
- Nolfi, S., y D. Floreano, *Evolutionary Robotics: The Biology, Intelligence, and Technology of Self-organizing Machines*, MIT Press, Cambridge, 2000.
- , "Synthesis of Autonomous Robots through Evolution", *Trends in Cognitive Science*, 6: 31-37, 2002.
- Oberholzer, T., M. Albrizio y P. L. Luisi, "Polymerase Chain Reaction in Liposomes", *Chemistry and Biology*, 2: 677-682, 1995.
- Olsen, E. T., "Ontological Basis of Strong Artificial Life", *Artificial Life*, 3, 1997.
- Pattee, H. H., "Simulations, Realizations, and Theories of Life", en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Oxford, 1996, pp. 379-393.
- Pfeiffer, R., J. C. Bongard, R. Brooks y S. Iwasawa, *How the Body Shapes the Way We Think: A New View of Intelligence*, MIT Press, Cambridge, 2006.
- Pohorille, A., y D. Deamer, "Artificial Cells: Prospects for Biotechnology", *Trends in Biotechnology*, 20 (3): 123-128, 2002.
- Pollack, J. B., H. Lipson, G. Hornby y P. Furies, "Three Generations of Automatically Designed Robots", *Artificial Life*, 7 (4): 215-223, 2001.

- Putman, H., "Robots: Machines or Artificially Created Life?", *Journal of Philosophy*, 61 (21): 668-691, 1964.
- Rasmussen, S., N. A. Baas, B. Mayer, M. Nilsson y M. W. Olesen, "Ansatz for Dynamical Hierarchies", *Artificial Life*, 7 (4): 329-353, 2001.
- Rasmussen, S., L. Chen, D. Deamer, D. C. Krakauer, N. H. Packard, P. F. Stadler y M. A. Bedau, "Transitions from Nonliving to Living Matter", *Science*, 303: 963-965, 2004.
- Rasmussen, S., L. Chen, M. Nilsson y S. Abe, "Bridging Nonliving and Living Matter", *Artificial Life*, 9: 269-316, 2003.
- Rasmussen, S., M. A. Bedau, L. Chen, D. Deamer, D. C. Krakauer, N. H. Packard y P. F. Stadler (comps.), *Protocells, Bridging Nonliving and Living Matter*, MIT Press, Cambridge, 2008.
- Ray, T. S., "An Approach to the Synthesis of Life", en C. G. Langton, C. Taylor, J. D. Farmer y S. Rasmussen (comps.), *Artificial Life II*, Addison-Wesley, Redwood City, 1992, pp. 371-408.
- , "An Evolutionary Approach to Synthetic Biology: Zen and the Art of Creating Life", *Artificial Life*, 1: 179-210, 1994.
- Regis, E., *What is Life? Investigating the Nature of Life in the Age of Synthetic Biology*, Farrar, Straus, and Giroux, Nueva York, 2008.
- Sagre, D., D. Ben-Eli y D. Lancet, "Compositional Genomes: Prebiotic Information Transfer in Mutually Catalytic Noncovalent Assemblies", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97: 4112-4117, 2000.
- Sipper, M., "Fifty Years of Research on Self-replication: An Overview", *Artificial Life*, 4 (3): 237-257, 1998.
- Solé, R. V., S. Rasmussen y M. A. Bedau (comps.), "Towards the Artificial Cell", *Philosophical Transactions of the Royal Society B*, 362: 1723-1925, 2007.
- Szostak, J. W., D. P. Bartel y P. L. Luisi, "Synthesizing Life", *Nature*, 409: 387-390, 2001.
- Takakura, K., T. Toyota y T. Sugawara, "A Novel System of Self-reproducing Giant Vesicles", *Journal of the American Chemical Society*, 125: 8134-8140, 2003.
- Taylor, T., y C. Massey, "Recent Developments in the Evolution of Morphologies and Controllers for Physically Simulated Creatures", *Artificial Life*, 7: 77-87, 2001.
- Von Kiedrowski, G., "A Self-replicating Hexadeoxyriucleotide", *Angewandte Chemie*, 25: 932-935, 1986.
- Von Neumann, J., *Theory of Self-reproducing Automata*, University of Illinois Press, Urbana, Illinois, 1966.

- Wiener, N., *Cybernetics: Or Control and Communication in the Animal and the Machine*, MIT Press, Cambridge, 1948.
- Wolfram, S., *Cellular Automata and Complexity*, Addison-Wesley, Redwood City, 1994.
- Zimmer, C., *Microcosmos: E. coli and the New Science of Life*, Pantheon Books, Nueva York, 2008.

LA DEFINICIÓN Y LA EXPLICACIÓN DE LA VIDA

- Auffray, C., S. Imbeaud, M. Roux-Rouquie y L. Hood, "Self-organized Living Systems: Conjunction of a Stable Organization with Chaotic Fluctuations in Biological Space-Time", *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A*, 361: 1125-1139, 2003.
- Bedau, M. A., "The Nature of Life", en M. A. Boden (comp.), *The Philosophy of Artificial Life*, Oxford University Press, Nueva York, 1996.
- , "What is Life?", en S. Sarkar y A. Plutynski (comps.), *A Companion to the Philosophy of Biology*, Blackwell, Nueva York, 2007, pp. 455-471.
- Benner, S. A., y C. Switzer, "Chance and Necessity in Biomolecular Chemistry: Is Life as We Know It Universal?", en H. Frauenfelder, J. Deisenhofer y P. Wolynes (comps.), *Simplicity and Complexity in Protein and Nucleic Acids*, Dahlem University Press, Berlín, 1999, pp. 339-363.
- Bruggeman, E., H. Westerhoff y E. Boogerd, "Biocomplexity: A Pluralist Research Strategy is Necessary for a Mechanistic Explanation of the 'Live'-State", *Philosophical Psychology*, 15: 411-440, 2002.
- Clark, B., "Astrobiology's Central Dilemma: How Can We Detect Life if We Cannot Even Define It?", *American Astronomical Society*, 33: 1152, 2001.
- Cleland, C. E., *The Quest for a Universal Theory of Life: Searching for Life as We Don't Know It*, Cambridge University Press, Cambridge, en prensa.
- Crick, F., *Life Itself: Its Origin and Nature*, Simon & Schuster, Nueva York, 1931.
- Davies, P., *The Fifth Miracle: The Search for the Origin and Meaning of Life*, Simon & Schuster, Nueva York, 1999.
- Dennett, D. C., *Darwin's Dangerous Idea: Evolution and the Meanings of Life*, Simon & Schuster, Nueva York, 1995.
- Eigen, M., *Steps towards Life*, Oxford, University Press, Oxford, 1992.
- Farmer, J. D., "Cool is Not Enough", *Nature*, 436: 627-628, 2005.

- Feldman, E., *Confrontations with the Reaper: A Philosophical Study of the Nature and Value of Death*, Oxford University Press, Nueva York, 1992.
- Fleischaker, G., "Autopoiesis: The Status of its System Logic", *Biosystems*, 22 (1): 37-49, 1988.
- , "Origins of Life: An Operational Definition", *Origins of Life and the Evolution of the Biosphere*, 20: 127-137, 1990.
- Fong, P., "Thermodynamic Statistical Theory of Life: An Outline", en A. Locker (comp.), *Biogenesis, Evolution, Homeostasis: A Symposium by Correspondence*, Springer, Berlín, 1973, pp. 93-101.
- Godfrey-Smith, P., "Spencer and Dewey on Life and Mind", en R. Brooks, y P. Maes (comps.), *Artificial Life IV*, Proceedings of the 4th International Workshop on the Synthesis and Simulation of Living Systems, MIT Press, Cambridge, 1994, pp. 80-89.
- Jonas, H., *The Phenomenon of Life: Toward Philosophical Biology*, Dell, Nueva York, 1966.
- Kauffman, S. A., *At Home in the Universe: The Search for Laws of Self-organization and Complexity*, Oxford University Press, Nueva York, 1995.
- , *Investigations*, Oxford University Press, Nueva York, 2000.
- Keller, E. E., *Making Sense of Life: Explaining Biological Development with Models, Metaphors, and Machines*, Harvard University Press, Cambridge, 2002.
- Korzeniewski, B., "Cybernetic Formulation of the Definition of Life", *Journal of Theoretical Biology*, 209: 275-286, 2001.
- Lovelock, J., *Gala: A New Look at Life on Earth*, Oxford University Press, Nueva York, 1979.
- Luisi, P. L., "About Various Definitions of Life", *Origins of Life and the Evolution of the Biosphere*, 28 (4-6): 613-622, 1998.
- , *The Emergence of Life: From Chemical Origins to Synthetic Biology*, Cambridge University Press, Cambridge, 2006.
- Margulis, L., y D. Sagan, *What is Life?*, University of California Press, Berkeley, 1995.
- Maturana, H., y E. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, D. Reidel, Boston, 1980.
- , *The Tree of Knowledge: The Biological Roots of Human Understanding*, Shambhala Publications, Boston, 1987.
- Maynard Smith, J., "Life at the Edge of Chaos?", en *New York Review of Books*, 42 (4): 28-30, 1995.
- Miller, J. G., *Living Systems*, McGraw-Hill, Nueva York, 1978.

- Morán, E., A. Moreno, E. Minch y E. Montero, "Further Steps towards a Realistic Description of the Essence of Life", *Artificial Life*, 5: 255-263, 1997.
- Murphy, M., y L. O'Neill, *What is Life? The Next Fifty Years: Speculations on the Future of Biology*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
- Pályi, G., C. Zucchi y L. Caglioti (comps.), *Fundamentals of Life*, Elsevier, Nueva York, 2002.
- Popa, R., *Between Necessity and Probability: Searching for the Definition and Origin of Life*, Springer, Berlín, 2004.
- Rizzoti, M. (comp.), *Defining Life*, Padova University Press, Padua, 1996.
- Rosen, R., *Essays on Life Itself*, Columbia University Press, Nueva York, 2000.
- , *Life Itself: A Comprehensive Inquiry into the Nature, Origin, and Fabrication of Life*, Columbia University Press, Nueva York, 1991.
- Schneider, E. D., "Gaia: Toward a Thermodynamics of Life", en S. H. Schneider, J. R. Miller, E. Christ y P. J. Boston (comps.), *Scientists Debate Gaia*, MIT Press, Cambridge, 2004, pp. 45-56.
- Schulze-Makuch, D., H. Guan, L. Irwin y E. Vega, "Redefining Life: An Ecological, Thermodynamic, and Bioinformatics Approach", en G. Pályi, C. Zucchi y L. Caglioti (comps.), *Fundamentals of Life*, Elsevier, Nueva York, 2002, pp. 169-180, 2002.
- Solé, R., y B. Goodwin, *Signs of Life: How Complexity Pervades Biology*, Basic Books, Nueva York, 2000.
- Sterelny, K., "Understanding Life: Recent Work in Philosophy of Biology", *British Journal of the Philosophy of Science*, 46 (2): 115-183, 1995.
- , "Universal Biology", *British Journal of the Philosophy of Science*, 48 (4): 587-601, 1997.
- Thompson, E., *Mind in Life: Phenomenology, and the Sciences of the Mind*, Harvard University Press, Cambridge, 2007.
- Thompson, M., "The Representation of Life", en R. Hursthouse, G. Lawrence y W. Quinn (comps.), *Virtues and Reasons*, Clarendon Press, Oxford, 1998, pp. 247-296, 1995.
- Varela, E., H. Maturana y R. Uribe, "Autopoiesis: The Organization of Living Systems, its Characterization and a Model", *BioSystems*, 5 (4): 187-196, 1974.
- Weber, B., "Life", en E. Zalta (comp.), *The Stanford Encyclopedia of Philosophy*, 2003. Disponible en <<http://plato.stanford.edu/archives/spr2006/entries/life/>>.

ACERCA DE LOS AUTORES

ARISTÓTELES (384 a. C.-322 a. C.), discípulo de Platón y maestro de Alejandro Magno, fue un prominente filósofo griego y una de las figuras más importantes y fundamentales de la filosofía occidental. Aristóteles fue el primero en crear un sistema completo en la filosofía occidental, abarcando la moral, la ciencia, la lógica, la estética, la metafísica y la política. Además, hay quienes lo consideran el iniciador del estudio científico de la vida, pues fue uno de los primeros que articuló un método sistemático y global para la investigación biológica. Realizó extensas investigaciones sobre los animales. Varias de sus observaciones biológicas tuvieron que esperar más de dos milenios para que la ciencia las confirmara.

MARK A. BEDAU es catedrático de filosofía y humanidades en el Reed College, editor principal de la publicación *Artificial Life* de la MIT Press, cofundador del European Center for Living Technology (Venecia), profesor adjunto de ciencias de sistemas en la Universidad de Portland State y profesor invitado en la European School of Molecular Medicine (Milán). Los campos de sus investigaciones incluyen la emergencia de la vida,¹ la adaptación y la evolución biológicas, la naturaleza de la vida, la vida artificial y las protocélulas, la evolución de la tecnología, los procesos de descubrimiento y optimización de la inteligencia autónoma, y las implicaciones sociales y éticas de la creación de vida en el laboratorio.

STEVEN A. BENNER es Distinguished Fellow en la Foundation for Applied Molecular Evolution y en el Westheimer Institute for Science and Technology. Cursó su licenciatura y maestría en biofísica molecular y bioquímica en la Universidad de Yale, y su doctorado en química en la Universidad de Harvard. Ha sido cofundador de varios dominios científicos, incluida la biología sintética, la paleogenética, la bioinformática evolutiva y la química dinámica combinatoria. Sus investi-

¹ La “emergencia” (de la vida) es un término que se repite a lo largo de todo este libro y que, a pesar de su posible ambigüedad, aquí se tradujo literalmente, en vez de decir, por ejemplo, surgimiento o aparición (de la vida). Al igual que muchos términos científicos en inglés, éste ha sido adoptado ampliamente por los científicos hispanoamericanos. [T.]

gaciones conjugan las tradiciones de la historia natural y las ciencias físicas con el fin de alcanzar una mejor comprensión de la vida.

MARGARET A. BODEN es profesora de investigaciones de la ciencia cognitiva en la Universidad de Sussex. Es miembro de la British Academy y de la American Associate for Artificial Intelligence y sus equivalentes británicos y europeos. En 2002 se le otorgó la Orden del Imperio Británico por sus “servicios a la ciencia cognitiva”; además de sus doctorados en Cambridge y Harvard ha recibido doctorados honorarios de las universidades de Bristol y Sussex y de la Open University. Su obra es altamente interdisciplinaria y ha sido traducida a 20 idiomas. Su último libro es *Mind as Machine: A History of Cognitive Science*, 2006.

MATTHEW A. CARRIGAN es investigador en la Foundation for Applied Molecular Evolution en Gainesville, Florida. Sus investigaciones se centran en el origen de la vida y la biología sintética, enfocadas particularmente en la síntesis y la estabilidad del espinazo de fosfato de azúcar del ARN y la polimerización de los ribonucleótidos. Actualmente su labor se dirige al aislamiento de un ARN ribosomal que sea capaz de catalizar la polimerización del ARN.

CHRISTOPHER CHYBA es profesor de ciencias astrofísicas y asuntos internacionales en la Universidad de Princeton. Trabajó en la Casa Blanca entre 1993 y 1995, donde participó en el National Security Council y la National Security Division of the Office of Science and Technology Policy. Su labor, relacionada con la seguridad, enfoca la proliferación nuclear, el control de armas nucleares y el terrorismo biológico, mientras que sus investigaciones de ciencia planetaria y astrobiología se enfocan en la búsqueda de vida en el Sistema Solar. Recibió el Premio Presidencial Early Career en 1996 y es miembro del programa MacArthur Fellow desde 2001. Además de su doctorado en astronomía, obtuvo la maestría en historia y filosofía de la ciencia en la Universidad de Cambridge.

CAROL E. CLELAND es profesora de filosofía en la Universidad de Colorado, en Boulder. Es miembro del Astrobiology Institute de la NASA (NAI) y del Center for Astrobiology de la Universidad de Colorado. Sus investigaciones abarcan las áreas de la filosofía de la ciencia, la lógica y la metafísica. Ha publicado artículos sobre el espacio y el tiempo, la superveniencia, los sucesos y la causación, la hipercomputación, la tesis de Church-Turing, los estándares de la evidencia en la ciencia, la metodología de la ciencia histórica y experimental, el problema de definir la

“vida” y la posibilidad de la existencia de vida microbiana alternativa en la Tierra. Actualmente está por terminar una obra titulada *The Quest for a Universal Theory of Life: Searching for Life as We Don't Know it*.

SHELLEY D. COPLEY es profesora de biología molecular, celular y del desarrollo en la Universidad de Colorado, en Boulder. Su labor se centra en la evolución molecular de los catalizadores y las vías metabólicas, a través de la historia de la vida en la Tierra, desde la aparición de las redes protometabólicas que sustentaron el mundo del ARN hasta la evolución de nuevas vías para la degradación de los contaminantes tóxicos introducidos en el medio ambiente durante el siglo pasado.

JOHN COTTINGHAM es profesor de filosofía en la Universidad de Reading, en Inglaterra. Es también presidente de la British Society for the Philosophy of Religion, director del programa de investigaciones Impartiality and Partiality in Ethics, y editor de *Ratio*, una revista internacional de filosofía analítica. Sus principales campos de investigación incluyen la filosofía moderna inicial (en particular Descartes), la ética y la filosofía de la religión.

RICHARD DAWKINS es un etólogo inglés, biólogo de la evolución y autor de libros científicos populares; famoso por su crítica de la religión, el creacionismo y el diseño inteligente.² Actualmente imparte la cátedra Charles Simonyi de Conocimiento Público de la Ciencia en la Universidad de Oxford. Su influyente primer libro, *The Selfish Gene*, publicado en 1976, popularizó la idea de la evolución basada en los genes e introdujo el término *meme* en el discurso sobre la evolución cultural. Es también miembro de la Royal Society y ha recibido los premios Faraday y Kistler. Su libro más reciente es *The God Delusion*, 2006.

DAVID DEAMER es profesor de investigaciones de ingeniería biomolecular en la Universidad de California, en Santa Cruz. Sus investigaciones incluyen el análisis de los nanoporos de los ácidos nucleicos y la biofísica de los procesos de autoensamblaje, particularmente los relacionados con la estructura y la función de las membranas biológicas. Su más reciente libro es *First Life: Discovering the Connections between Stars, Cells and How Life Began*, publicado en 2012.

² *Intelligent design*, o diseño inteligente, es otro término que aparece reiteradamente en este libro; se utiliza para describir una corriente teísta que sostiene que el origen del universo y la vida se deriva de las acciones e intenciones racionales y deliberadas de un “agente” inteligente. [T.]

RENÉ DESCARTES (1596-1650) fue un filósofo francés muy influyente, a quien generalmente se le considera el padre de la filosofía moderna. En su obra crucial, *Meditaciones acerca de la filosofía primera*, Descartes planteó el *cogito* como el primer paso en su indagación de los fundamentos racionales de la reflexión filosófica y la ciencia natural. En el curso de su vida, Descartes hizo contribuciones significativas a las matemáticas y la ciencia: inventó el sistema de coordenadas cartesiano, fundó la geometría analítica y descubrió las leyes de la refracción. Como partidario de la teoría del mecanicismo, Descartes también tuvo un papel importante en la revolución científica.

FRANCESCA FERRI labora actualmente en el Departamento de Neurociencias de la Universidad de Parma. Sus investigaciones abarcan la autoidentidad, la cognición corporificada (*embodiment*), la coherencia y los trastornos relacionados con la cognición corporificada del ser.

IRIS FRY enseña historia y filosofía de la biología en el Departamento de Humanidades y Artes del Technion-Instituto de Tecnología de Israel. Cursó estudios de química y bioquímica en la Universidad Hebrea de Jerusalén, así como de historia y filosofía de la ciencia en las universidades de Haifa y Tel Aviv. Sus obras publicadas examinan el concepto de la teleología en la filosofía de Kant, la historia de las ideas evolutivas y el origen de la vida. Su primer libro, *The Origin of Life — Mystery or Scientific Problem?*, apareció en Israel en 1997. Su segundo libro, *The Emergence of Life on Earth: A Historical and Scientific Overview*, fue publicado en 2000 por la Rutgers University Press.

TIBOR GÁNTI (1933-2009) fue ingeniero químico, biólogo teórico y doctor en biología. Su aportación principal fue la creación de la teoría del chemoton, que contiene la teoría de los autómatas fluidos (químicos) y su funcionamiento en los sistemas vivientes. Esta teoría permite precisar la distinción entre los entes vivientes y los entes no vivientes y la construcción de un modelo mínimo de la vida (el modelo del chemoton) exacto y cuantitativo, al mismo tiempo que proporciona los fundamentos teóricos para la investigación del origen de la vida, la biogénesis y la síntesis artificial de los sistemas vivientes.

PAUL GRIFFITHS es un filósofo de la ciencia que enfoca su trabajo en la biología y la psicología. Se educó en la Universidad de Cambridge y la Universidad Nacional Australiana, y en la actualidad es profesor emérito en la Universidad de Sídney.

ney, Australia, y profesor de filosofía de la ciencia en el ESRC Centre for Genomics in Society de la Universidad de Exeter, en Gran Bretaña. Es también miembro de la Australian Academy of the Humanities, miembro adjunto de la Facultad de Historia y Filosofía de la Ciencia de la University of Pittsburgh, y del Australian Health Ethics Committee, parte del National Health and Medical Research Council.

PAUL GUYER es profesor de filosofía y de la cátedra Florence R. C. Murray de Humanidades en la Universidad de Pennsylvania. Ha escrito y compilado diversos libros sobre la filosofía de Kant y fue el compilador general de la edición de Cambridge de las obras de Kant, para la cual cotradujo su *Crítica de la razón pura*, su *Crítica del juicio* y sus *Notas y fragmentos*. Guyer es miembro de la American Academy of Arts and Sciences y ha ganado el premio a la investigación Humboldt-Stiftung. Actualmente elabora una historia de la estética moderna.

IMMANUEL KANT (1724-1804) fue un filósofo alemán considerado universalmente uno de los pensadores más influyentes de la Europa moderna y del final del Siglo de las Luces. En su esfuerzo por entender los problemas de la filosofía de la mente, Kant desarrolló la doctrina del idealismo trascendental, que se considera una propuesta intermedia entre las tradiciones contrarias del racionalismo y el empirismo. Kant expuso esta doctrina en su monumental *Crítica de la razón pura*, aparecida en 1781, una de las obras maestras de la historia de la filosofía. Kant también ejerció una profunda influencia en la filosofía de la moral, alegando que la moralidad es un requisito de la razón misma.

STUART A. KAUFFMAN es profesor de ciencias biológicas, física, astronomía y filosofía en la Universidad de Calgary, y director del Institute for Biocomplexity and Informatics (IBI) y del Informatics Circle of Research Excellence (ICORE). Sus investigaciones abarcan la genética del desarrollo, la biología teórica, la evolución y el origen de la vida. Miembro del programa MacArthur Fellow, en 1997 recibió la medalla de oro de la Accademia Nazionale dei Lincei, y el premio Herbert A. Simon en 2000.

EVELYN FOX KELLER obtuvo su doctorado en física teórica en la Universidad de Harvard y ha estudiado durante años la interfaz de la física y la biología. Actualmente es profesora emérita de historia y filosofía de la ciencia en el MIT Program

of Science, Technology and Society. Ha escrito diversas obras, entre las que se encuentran *Refiguring Life: Metaphors of Twentieth Century Biology*, 1995; *The Century of the Gene*, 2000, y *Making Sense of Life: Explaining Biological Development with Models, Metaphors, and Machines*, 2002. Keller ha recibido varios premios y doctorados honorarios. Es miembro del programa MacArthur Fellow, de la American Philosophical Society y de la American Academy of Arts and Sciences. Recientemente obtuvo la Cátedra de Investigaciones Blaise Pascal, en París.

DANIEL E. KOSHLAND, JR. (1920-2007) fue miembro de la National Academy of Sciences y director de la importante revista *Science* de 1985 a 1995. Durante la segunda Guerra Mundial participó en el Proyecto Manhattan trabajando en la purificación del plutonio. En la primera parte de su carrera, su investigación de las enzimas le llevó a proponer el modelo del “ajuste inducido” de la catálisis enzimática, que modificó totalmente el concepto de la función enzimática que durante un siglo había existido. Posteriormente, Koshland dirigió la reorganización total de la enseñanza de la biología en la Universidad de California, en Berkeley, alineando los cursos con los adelantos en la genética y en otras ciencias de la vida. Ganó en 1990 la Medalla Nacional de la Ciencia, y sus últimos trabajos se centraron en la producción de metano en las algas verdes azules.

MARC LANGE es profesor de la cátedra Bowman y Gordon Grey de Filosofía en la Universidad de North Carolina, en Chapel Hill. Sus investigaciones abarcan los temas de la explicación científica, la confirmación inductiva, las categorías naturales, la enfermedad, la necesidad y la posibilidad. Sus libros más recientes son *Laws and Lawmakers* (2009), que expone el concepto de una ley de la naturaleza, y *Locality, Fields, Energy, and Mass: An Introduction to the Philosophy of Physics* (2002). Es miembro de la American Philosophical Association y de la Philosophy of Science Society.

HOD LIPSON es profesor asociado de ingeniería mecánica y aeronáutica en la Universidad de Cornell, en Ithaca, Nueva York. Recibió su doctorado en 1998 en el Instituto de Tecnología de Israel, y seguidamente obtuvo, siendo profesor, sendos posdoctorados en la Universidad de Brandeis y en el MIT. Actualmente Lipson dirige el grupo Computational Synthesis, que estudia las nuevas formas de generar el diseño automático y la construcción y adaptación de máquinas virtuales y físicas. Ha sido precursor en áreas como la robótica evolutiva, el prototipado

funcional multimaterial rápido, la autorreplicación de las máquinas y el autoensamblaje programable.

PIER LUIGI LUISI es profesor de biofísica en la Universidad de Roma (Roma Tre) y profesor emérito de química macromolecular en el Instituto Suizo Federal de Tecnología (ETH), en Zúrich. Sus preocupaciones científicas se centran principalmente en el origen de la vida y el estudio de la química macromolecular, la enzimología y el autoensamblaje de las estructuras de las micelas, las micelas reversibles, los liposomas y las vesículas gigantes. En los últimos años, sus investigaciones han abarcado la implementación química de la autopoiesis, la construcción de las células mínimas y el origen de la complejidad celular y de la autorreproducción en las estructuras supramoleculares.

LYNN MARGULIS (1938-2011) fue profesora universitaria distinguida en el Departamento de Geociencias de la Universidad de Massachusetts-Amherst. Fue miembro de la National Academy Science y publicó trabajos sobre la simbiogénesis y sobre la hipótesis de Gaia (de J. E. Lovelock). Es conocida por su teoría endosimbiótica del origen de ciertos organelos eucariotas, teoría hoy aceptada generalmente por la comunidad científica. Por sus contribuciones a la comprensión de los organismos vivos, Lynn Margulis recibió en 1999, de William J. Clinton, la Medalla Presidencial de la Ciencia.

ERIC MATTHEWS es profesor emérito de filosofía y profesor honorario de ética médica y psiquiátrica en la Universidad de Aberdeen, en Escocia. Ha estudiado a los filósofos franceses Henri Bergson, Jean-Paul Sartre y Maurice Merleau-Ponty y ha traducido diversas obras de filósofos alemanes para la Cambridge University Press. Sus investigaciones más recientes examinan la ética de la divulgación de la información genética y los problemas éticos y sociales en la crisis venidera de la creciente población de adultos mayores. Su libro más reciente (2007) es *Body Subjects and Disordered Minds: Treating the Whole Person in Psychiatry*.

ERNST MAYR (1904-2005) es ampliamente reconocido como uno de los biólogos evolucionistas más prominentes del siglo xx. Su labor contribuyó a la revolución conceptual que condujo a la síntesis evolutiva moderna de la genética mendeliana, la sistemática y la evolución darwiniana. Mayr también contribuyó al desarrollo del concepto de especie biológica que actualmente se emplea. Entre otros galardones, recibió en 1970 la Medalla Nacional de la Ciencia, en 1983 el Premio

Balzan, en 1994 el Premio Internacional de Biología y en 1999 el Premio Crafoord.

ÁLVARO MORENO es profesor de filosofía de la ciencia en la Universidad del País Vasco. Encabeza un grupo de investigadores especializado en los sistemas complejos, la filosofía de la biología y la vida artificial. Moreno ha organizado varios simposios internacionales y publicado diversos trabajos sobre la relación entre la vida artificial y la inteligencia artificial.

DUGALD MURDOCH cursó estudios superiores en las universidades de Glasgow, Uppsala y Oxford; actualmente es profesor de filosofía en la Universidad de Estocolmo. Sus investigaciones se sitúan en las áreas de la filosofía de la ciencia, la epistemología y la historia de la filosofía moderna (especialmente la filosofía de Descartes). En la actualidad, Murdoch estudia la naturaleza de las razones de la creencia.

KENNETH H. NEALSON es profesor de la cátedra Wrigley de Ciencias Ambientales en la Universidad de Southern California, e investigador distinguido en el J. Craig Venter Institute of Environmental Genomics. Sus investigaciones se enfocan en el papel de los microbios en los ciclos biogeoquímicos de los elementos, especialmente el hierro y el manganeso. También ha estudiado la definición de la vida y, a partir de hábitats extremos en la Tierra, la detección de vida en medios extra-terrestres.

ALEXANDER OPARIN (1894-1980) fue pionero de la idea de que la vida surgió de la materia inorgánica mediante la generación espontánea de compuestos orgánicos sencillos a partir de moléculas inorgánicas en el medio ambiente prebiótico. En su obra, Oparin describe las diversas vías mediante las cuales los compuestos biológicos principales, como los aminoácidos, los ácidos grasos volátiles y los carbohidratos, pudieron haberse formado en la atmósfera químicamente reductiva que, según su hipótesis, existía en la Tierra primitiva. Oparin recibió en 1979 la Medalla de Oro Lomonosov de la Academia de Ciencias de la URSS por su trabajo en el campo de la bioquímica.

LESLIE E. ORGEL (1937-2007) fue un importante biólogo y uno de los padres de la teoría del mundo del ARN y del concepto de la panspermia. Nacido en Londres, Orgel obtuvo su licenciatura y doctorado en la Universidad de Oxford, y prosi-

guió sus estudios e investigaciones en las universidades de Cambridge y de Chicago, y en el California Institute of Technology. Colaboró con la NASA en el análisis de los descubrimientos realizados por las misiones Viking a Marte y fue uno de los cinco investigadores principales en el programa NSCORT de exobiología patrocinado por el mismo organismo. Fue miembro de la Royal Society, de la National Academy of Sciences y de la American Academy of Arts and Sciences.

NORMAN R. PACE es profesor distinguido en la Universidad de Colorado, en Boulder, e investigador en el Astrobiology Institute de la NASA. Sus investigaciones se centran en la bioquímica del ARN, la utilización de herramientas moleculares en los problemas de ecología microbiana y el desarrollo de métodos para analizar los aspectos filogenéticos y cuantitativos de las poblaciones microbianas naturales sin la necesidad de realizar cultivos en laboratorio. Es miembro de la National Academy of Sciences y de la American Association for the Advancement of Science. Obtuvo en 2008 sendos premios de la RNA Society y de la International Society for Microbial Ecology por su trayectoria profesional.

JULI PERETÓ es profesor de bioquímica y biología molecular en la Universitat de València e investigador en el Institut Cavanilles de Biodiversitat i Biologia Evolutiva. De 2005 a 2008 Peretó fungió como secretario de la International Society for the Study of the Origin of Life (ISSOL —International Astrobiology Society—). Sus investigaciones abarcan la evolución de las redes metabólicas, el concepto del genoma mínimo y la historia de las ideas sobre la síntesis artificial de vida y su origen natural.

JORDAN P. POLLACK es profesor del Departamento de Ciencia Computacional en la Universidad Brandeis, así como del Volen Center for Complex Systems. Dirige un laboratorio de investigaciones que busca una comprensión fundamental y replicable de la manera en que la naturaleza puede “diseñar” máquinas biológicas complejas. Junto con Hod Lipson, Pollack dirigió el proyecto GOLEM (Genetically Organized Lifelike Electro Mechanisms [electromecanismos genéticamente organizados similares a los organismos vivos]) a fin de desarrollar sistemas electromecánicos sencillos totalmente originales que produzcan máquinas de locomoción.

ALONSO RICARDO es miembro del Szostak Lab, un grupo de investigadores que pretende crear los componentes funcionales de una protocélula. Obtuvo su doctorado en la Universidad de Florida, donde Steven Benner fue su director de te-

sis. Sus investigaciones se centran en la química biorgánica, el origen de la vida y la utilización del proceso de despliegue del ARNm como herramienta para descubrir nuevos antibióticos.

KEPA RUIZ-MIRAZO es actualmente miembro investigador del Centro Ramón y Cajal de la Universidad del País Vasco. Trabaja en el Departamento de Lógica y Filosofía de la Ciencia y en la Unidad de Investigaciones de Biofísica (CSIC-UPV/EHU). Tiene maestría en física y doctorado en sistemas complejos. Sus investigaciones actuales abarcan diversas disciplinas, centrándose en la definición de la vida, los modelos protocelulares (*in vitro* e *in silico*) y las transiciones principales en el origen de los sistemas vivientes.

CARL SAGAN (1934-1996), astrónomo, astroquímico y escritor, fue pionero en la exobiología al promover la búsqueda de seres inteligentes extraterrestres, y popularizó exitosamente la astronomía, la astrofísica y otras ciencias naturales. Tuvo un papel importante en el programa espacial norteamericano desde su inicio, siendo consejero de la NASA y participando directamente en las misiones Apolo, Mariner, Viking y Galileo. Autor famoso y ganador del Premio Pulitzer, Sagan recibió 22 galardones académicos de universidades norteamericanas por sus contribuciones a la ciencia, la literatura, la educación y la preservación del medio ambiente. Como uno de los primeros científicos que sugirió la posibilidad de un invierno nuclear, también recibió múltiples galardones por su investigación de las consecuencias a largo plazo de la guerra nuclear y por su oposición a la carrera armamentista nuclear.

DORION SAGAN es escritor científico norteamericano y miembro rector de Sciencewriters, una organización cuya meta es el progreso de la ciencia promovida con la “seducción mediante los mejores libros, videos y otros medios que se puedan producir”. Ha sido autor y coautor de diversos ensayos y más de 14 libros sobre la evolución y otros temas de biología. Ha ganado el Premio Ed-Press de la Educational Press Association of America por sus contribuciones al periodismo educativo. Su libro más reciente, *Death and Sex*, obtuvo el primer lugar en la Muestra de Libros de Nueva York en la categoría de obras de divulgación documental.

ERWIN SCHRÖDINGER (1887-1961) fue un físico austriaco muy conocido por sus contribuciones a la mecánica cuántica, en particular la ecuación de Schrödinger,

por la cual obtuvo el Premio Nobel en 1933. También creó el famoso experimento mental del “gato de Schrödinger” a fin de ilustrar lo que veía como un defecto en la interpretación de la mecánica cuántica de la escuela de Copenhague. En 1944 Schrödinger publicó *What is Life?* [¿Qué es la vida?], donde expuso el concepto de una molécula compleja que sería la portadora de la información genética. Esta obra influyó directamente en las investigaciones de James Watson y Francis Crick y su descubrimiento del ADN en 1953.

ROBERT SHAPIRO es profesor e investigador emérito en el Departamento de Química de la Universidad de Nueva York. Es autor y coautor de más de 125 publicaciones, primordialmente en las áreas de la química del ADN y el origen de la vida. En sus investigaciones, él y sus colegas han estudiado las formas en que las sustancias químicas ambientales pueden perjudicar la sustancia hereditaria, causando daños que pueden producir mutaciones y cáncer. Sus investigaciones han sido respaldadas por numerosas becas otorgadas por el National Institute of Health, el Department of Energy, la National Science Foundation y otras instituciones.

CHRISTOPHER SHIELDS es profesor de filosofía clásica en la Universidad de Oxford y Tutorial Fellow en Lady Margaret Hall. Sus trabajos abarcan la filosofía clásica, la metafísica y la filosofía de la mente. Ha publicado *Order in Multiplicity* (1999), *Classical Philosophy: A Contemporary Contribution* (2003) y, con Robert Pasnau, *The Philosophy of Thomas Aquinas* (2004). Pronto aparecerá su traducción (anotada) de *De anima* de Aristóteles en la Clarendon Aristotle Series de la Oxford University Press.

ELLIOT SOBER es profesor de la cátedra Hans Reichenbach de Filosofía y profesor investigador de la cátedra William F. Vilas en la Universidad de Wisconsin-Madison. Sus investigaciones se basan en la filosofía de la ciencia, enfocadas particularmente en la filosofía de la biología evolutiva. Algunas obras son *The Nature of Selection — Evolutionary Theory in Philosophical Focus* (1984), *Reconstructing the Past — Parsimony, Evolution, and Inference* (1988), *Unto Others — The Evolution and Psychology of Unselfish Behavior* (1998, con David Sloan Wilson) y *Evidence and Evolution — The Logic Behind the Science* (2008).

PASQUALE STANO es colaborador del profesor Pier Luigi Luisi en la Universidad de Roma (Roma Tre). Sus investigaciones se relacionan con las propiedades y la

reactividad de las vesículas y otros conjuntos supramoleculares. Actualmente participa en el proyecto Synthcells de la Unión Europea.

KIM STERELNY es un filósofo australiano; profesor de filosofía, afiliado tanto al Programa de Filosofía de la Research School of Social Sciences (rsss) de la Universidad Nacional de Australia como al Programa de Filosofía de la Universidad de Victoria, en Wellington. Es editor de *Biology and Philosophy*, la principal publicación sobre filosofía de la biología, coeditor de la colección *Life and Mind* de la MIT Press, y ha ganado diversos premios internacionales de filosofía de la ciencia, incluido el Lakatos y el Jean-Nicod. Sterelny es también miembro de la Australian Academy of the Humanities. Sus investigaciones principales se relacionan con la filosofía de la biología, la filosofía de la psicología y la filosofía de la mente.

ROBERT STOOThOFF es profesor emérito en la Escuela de Filosofía y Estudios Religiosos de la Universidad de Canterbury, en Nueva Zelanda. Su compilación (con John Cottingham y Dugald Murdoch) *The Philosophical Writings of Descartes*, publicada por la Cambridge University Press, se ha convertido en la edición canónica de la obra filosófica de Descartes. Stoothoff fue también coautor, con Jack Copeland, del artículo sobre las teorías del significado en la *Encyclopedia of Philosophy* (1988).

ANN SYNGE (1916-1998) estudió medicina en Cambridge y Dublín antes de casarse con el doctor Richard L. M. Synge, ganador del Premio Nobel, con quien tuvo ocho hijos. Empezó a traducir obras rusas en 1954, cuando vertió al inglés el libro de A. I. Oparin, *Life: Its Nature, Origin and Development*. También tradujo *Protein Biosynthesis and Problems of Heredity Development and Aging*, de Zhores A. Medvedev (1966). Posteriormente, Ann Synge fue profesora de biología y participó activamente en el movimiento por el desarme nuclear y la paz mundial.

ÍNDICE ANALÍTICO

- Abelson, Hal: 589
 aborto: 224
 ácido nucleico: 170, 175, 177, 179-180, 194, 209, 215, 222, 239-242, 244-245, 249, 256, 261, 262-265, 289, 296, 299, 303-306, 310, 312, 314-315, 327, 330, 335, 366, 392, 406-409, 411, 415, 417, 424, 547, 565, 619, 625, 654, 667, 729; *véase también* ADN, ARN
 acoplamientos endergónicos-exergónicos: 640-641, 644-645
 actividad modular: 647
 adaptabilidad: 196, 626-628, 632, 634, 647, 736
 adaptación: 37, 162-165, 176, 178-179, 193, 195-196, 200, 202, 247, 280, 283, 414, 416, 433-434, 481, 483, 507, 521, 554, 604, 610, 635, 664, 692, 696, 707, 709; compleja: 611, 613, 620, 722-723, 732-755, 787; flexible: 599-600, 612-613, 797-818
 adecuación: 97, 308, 341-342, 373, 432, 450, 464, 509, 514, 531, 534-535, 540
 adenina: 242, 244, 257, 342-343, 372
 ADN, estructura: 33, 175, 178, 242-244, 265, 271-273, 408-409, 411, 418, 421, 424-425, 465, 761, 764-765; metabolismo: 28, 557-558; mitocondrial: 725; nuclear: 725; recombinado: 208, 588, 752; reparación: 364, 408, 557-558; replicación: 221, 243, 271-272, 366, 752, 762, 764, 766; corrección de pruebas: 723
 declaración de identidad teórica: 603-604, 606-607, 661, 671, 674-676, 678, 680, 684
 agencia: 91, 734
 Agustín, san: 178
 aislamiento: 34, 250, 348-349, 355, 358-359, 376, 430, 601, 627, 634
 aminoácido, la aleatoriedad y el origen de la vida: 301; D: 410, 414; estructura: 241-245, 409-411; L: 410, 414; multimerización aleatoria de pequeños péptidos a través de aminoácidos: 241, 320; secuencias protei-
 cas: 272, 284, 295; síntesis: 256-258, 260, 274
 amoniaco: 256-257, 354-356, 360, 363, 413
 amibas: 220, 391, 513, 675, 695
 anabolismo: 515, 644
 Anaxágoras: 65
 anticuerpos: 424-425, 519, 739, 775
 antinomia: 87-90
 antirrealismo: 604-605
 aprendizaje, definiciones del: 696, 709, 737-738; imitación en el: 739; latente: 739; en las máquinas: 168, 541; reforzado: 519, 738-739
 Aquino, Tomás de: 490-491
 árbol filogenético: 335, 337-338, 391, 421, 533-534; *véase también* filogenia
 Archaea: 336-337, 375, 393, 416-417, 421
 arcilla, cristales inorgánicos de: 246, 263, 327, 803
 Aristóteles: 23-25, 28-31, 39-52, 153, 156, 162, 164, 177, 181, 185, 189, 240-241, 247, 454, 489-490, 662, 675, 681, 814
 ARN: 28, 33, 241-248, 252, 260-266, 272-277, 281-284, 304-307, 310-315, 320, 335-338, 341-342, 365-366, 368, 373, 375-376, 391-392, 412, 418, 421-422, 434, 456, 465, 544-545, 547-549, 557, 560-567, 569-575, 578, 627, 646, 648, 654-655, 668, 678, 754, 761-762, 764-768, 770-771, 774-775
 arqueobacterias hipertermófilas: 230, 333, 397-398, 675
 astrobiología: 403, 456, 631, 654, 677
 astronomía: 31, 122, 326, 419, 734
 átomos, dimensión de los: 118-123, 733; ordenación de los átomos en los organismos: 116, 128, 130-133, 143-144, 147, 703, 733, 761; radioactivos: 146
 ATP, en la célula mínima: 561; formación del: 346; en la glicólisis: 353; origen del: 320, 515, 549, 642; sintetasa: 547

- automantenimiento: 26, 455, 516, 551-552, 560, 563, 601, 607, 610, 636-637, 639, 642-645, 654, 666, 718
 autómatas, blandos: 226; fluidos: 225-228; químicos: 27, 225
 autonomía, y biología: 211, 297-298, 300; y definiciones de la vida: 630-656; y vida artificial: 507, 529, 538
 autoorganización: 23, 26, 240, 245, 247, 251, 259-266, 285, 288, 292, 295, 299, 301-302, 305-309, 314, 317-318, 322, 440, 497, 507, 513, 523-526, 538, 610-611, 632, 634-635, 638, 641, 642-643, 655, 790-792
 autopoiesis: 27, 455, 524, 577, 600-602, 607, 634, 637-640, 642, 690, 699, 701, 711, 717; *véase también* definiciones de la vida
 Ayala, Francisco: 297n, 731n

 bacterias: 124, 155, 160, 170, 224, 230, 239, 242, 294, 331, 333, 336-337, 362, 390, 392-394, 397, 399-400, 403, 414, 416-417, 419-421, 423, 435, 449, 455, 544, 547, 556-558, 588, 608, 618, 675, 679, 691-697, 700, 705, 708, 711-714, 716-717, 755, 766, 790, 813
 bacteriorrodopsina: 549
 Bateson, William: 740n, 750-751
 Bateson, P. P. G.: 738n
 Bedau, Mark: 26, 30, 35, 241, 521, 523-524, 599-600, 602-603, 610, 613, 795-821
 behaviorismo: 462, 471
 Belousov-Zhabotinski, reacción BZ: 513, 764
 Benner, Steven: 240, 242-244, 246, 250-251, 253, 340, 409, 452, 600, 609, 613
 Bernal, J. D.: 164, 302, 319n
 Bernard, Claude: 159, 163, 192, 197
 bioenergética: 414n, 515, 525, 631, 655
 biogénesis: 290, 304, 315-316, 706; *véase también* ortogénesis
 biología sintética: 341, 368, 445-457, 654, 774; *véase también* protocélula
 biopolímeros: 341, 368, 432, 654, 774
 bioquímicas alienígenas: 731
 Block, Ned: 465, 467-469
 Blumenbach, J. F.: 197-198, 202
 Boden, Margaret: 30, 33, 446, 449-450, 452-454, 506-528, 803
 Bohr, Niels: 202-203, 205, 703
 Boltzmann, Ludwig: 122; ecuación de Boltzmann: 142-143
 botánica: 192, 750
 Bro, P.: 656n
 Brock, T. D.: 421
 Brooks, Rodney: 446n, 516n, 585, 592, 636
 Brown, Robert: 434n, 492
 browniano, "ataque": 150; movimiento browniano: 123-127, 146, 149, 194

 Cairns-Smith, Alexander: 246, 263, 290, 292, 294, 311, 351, 433, 754n
 Calvin, William: 709
 capacidad evolutiva: 455, 551-552, 563, 602, 639-641, 651, 655
 Carrigan, Mathew: 240, 242-243, 246, 250, 340, 436
 catabolismo: 515, 644
 catálisis: 260, 306-307, 359, 368, 519, 525, 612, 649, 766, 771, 774-776, 803
 categoría/convencción: humana: 453-457, 590, 594
 categorías naturales: 452, 456, 485, 495-496, 498-502, 504, 521, 590, 594, 604-606, 608, 671, 674-675, 681-682, 684-685
 causas, cuatro: 23, 28-29, 59-60, 74-81, 88-95, 97, 105-110, 112-114
 Cech, Tom: 422
 células, artificial: 448, 457, 565-566; división celular: 194, 221-222, 560, 563-564, 576; mínima: 448, 455, 551-580, 613; respiración celular: 172, 388, 394-397, 515, 704-705, 713
 cerebro: 53-62, 120, 168, 218, 232, 453, 461-472, 519, 531-532, 541, 695-696, 706, 709-712, 727, 740, 806
 Chargaff, Erwin: 175
 chemoton: 27, 36, 214, 218, 223, 226-234, 455; *véase también* autómatas químicos
 Chyba, Christopher: 251, 253, 457, 600, 602-604, 606, 608, 612, 631, 661-685
 cianobacterias: 336, 399, 705, 712
 ciberespacio: 508, 511, 517-518, 526, 585-587
 cibernética: 167-170, 173, 175-176, 178, 507, 600
 ciclo de predadores-presas: 394, 414, 450, 464, 471, 487, 519, 742

- cigotos: 211
 ciliados: 409, 695
 circuito eléctrico: 530
 citoesqueleto: 331
 citología: 192, 303
 citoplasma: 194, 201, 220, 229, 547
 cladogénesis: 732
 Cleland, Carol: 251-253, 406, 457, 600, 602-604, 606, 608, 612, 631, 661-685
 clonación: 587, 711, 774, 813
 cloroplasto: 233, 336, 471, 712
 codón: 249, 409-410
 coevolución: 249, 315, 434-436, 509, 531, 541, 691-693, 788
 cognición: 70-72, 76-77, 80-81, 86-90, 95-100, 102-106, 474, 478, 526
 compartimentación celular: 304, 314-315,
 compartimento: 276, 280-281, 283, 304, 314-315, 319, 349, 354, 454, 545, 551, 562-578, 625, 634
 competencia: 252, 375, 414, 648, 721-722, 812, 815
 complejidad: 32, 34-35, 156, 159-162, 170, 172, 186, 196, 205, 209, 211, 219, 221, 224, 241, 244, 249, 252, 256, 278, 286, 302, 328-330, 409, 435-436, 551, 557, 563, 565-566, 572, 575, 577, 602, 620-622, 639, 641-643, 646-647, 649-650, 652, 692, 699, 706, 723, 732-735, 742, 744, 745-746, 748, 750-756, 766-767, 770, 781, 783, 790, 806-807, 810, 814
 complejidad adaptiva, *véase* adaptación, compleja
 comprensión humana: 101
 computación: 35, 253-254, 437, 445-446, 449, 451, 453-454, 460-461, 465, 473-476, 479, 481-483, 501-503, 506-509, 511, 518-520, 529, 539, 542, 558-559, 585-590, 609, 611, 656, 666-667, 678, 693-694, 725-728, 752, 773, 787, 805, 811-812
 computación amorfa: 588-589
 computadora cósmica: 526
 conciencia: 94, 102-103, 159, 691, 697, 699-700, 704, 707-708, 816
 conducta aprendida: 737
 conservación ortóloga de los genes: 558; *véase también* homología
 conveniencia: 798
 Copley, Shelley: 242, 252, 406
 corazón: 53-55, 57-58, 61-63, 520, 626, 698, 745, 805, 810
corpus callosum: 740
 Cottingham, John: 53n
 creacionismo: 248, 288, 300-301, 327-328, 521, 742-743, 746
 Crick, Francis: 202, 246, 264-265, 271, 293-294, 302, 365, 367, 371-372, 408, 736, 764
 cristal: 33, 118, 130, 132, 145, 152, 174, 143, 327, 344-345, 360, 374, 484, 663, 670, 677, 679, 713, 753, 761-762
 cristales inorgánicos de arcilla: 246, 263, 327, 803; y el origen de la vida: 246, 263, 290, 311, 433, 804; *véase también* origen de la vida
 cristalografía: 224
 cromosoma: 117, 132, 137, 139, 145, 152, 174, 193, 312, 690
 cruzamiento: 137, 727
 Darwin, Charles: 26, 164, 180, 187, 200, 240, 464, 522, 610, 619, 697, 699-702, 706, 715, 731-732, 742-744, 746-751, 759, 761, 772-773, 790-791
 Davies, P. C.: 252, 407, 415
 Dawkins, Richard: 26, 30, 253, 272, 454, 599, 609-613, 723-724, 731-756
 Deamer, David: 279, 448, 454-456, 544, 553, 613
 definición de la vida: 29, 153, 155-156, 158-160, 162-164, 166, 188, 192, 251, 253, 343-351, 390, 400-403, 432-434, 451-452, 454, 483, 485-486, 545-546, 551-552, 590-592, 600-601, 617, 621, 668-669, 661, 664, 671-672, 675, 677, 720-729; bioquímica: 214-235, 245, 327-334, 340-376, 619, 662-663, 665; evolucionista/darwiniana: 26, 250, 340-376, 433-436, 551-552, 602, 630-656, 662-663, 665-668, 795-818; fisiológica: 223, 298, 618, 662; genética: 175, 208-209, 245, 249, 334-338, 619-621, 662-663, 795-818; metabólica: 116-152, 208-211, 222, 245, 385-404, 506-526, 618, 636-640, 662-663; teleonómica: 210; *véase también* autopoiesis; vida
 definiciones, completa: 669; estipulativa: 604, 668, 674; ideal: 604, 670-671, 674; léxica:

- 668, 670, 720; operativa: 604, 667, 669, 670;
ostensiva: 669-670
- Delbrück, Max: 128-129, 137-138
- Demócrito: 92
- Dennett, Daniel: 462, 725
- Descartes, René: 23-25, 28, 30-32, 53, 154, 163,
166, 187, 190, 195, 240, 446, 696-697, 707,
816
- desequilibrio químico: 27, 250-251, 332, 347,
352, 354, 376, 432, 437, 439-440, 715
- Diderot, Denis: 154
- difusión: 123-126, 142, 146, 278, 281, 314, 333,
354, 517, 626
- dilema del prisionero: 817
- diploide: 146, 472
- dogma central (de la biología molecular): 421
- Drexler, Eric: 517
- Driesch, Hans: 163, 194, 199-200, 486
- Drosophila*: 136, 473, 746
- dualismo: 187, 209, 462-463, 816
- Dyson, Freeman: 281, 303, 312, 314, 553, 589
- E. coli*: 559, 572-573, 577
- ecología: 712, 722, 802; profunda: 717
- ecopoiesis: 653
- ecosistema: 423, 649, 666, 706, 710, 714-715,
717-718, 805; de clímax: 802-803
- Edelman, Gerald: 709
- Eigen, Manfred: 296, 298, 304-317, 650, 767
- Einstein, Albert: 674
- Eklund, E. H.: 261
- Eldredge, N.: 743n
- electrón: 134, 136, 223, 279, 320, 331, 369, 485-
486, 511, 668, 753
- embriología: 193-194, 740-741
- emergencia: 35, 207-208, 241, 245-246, 248,
252, 507, 760, 762, 764-765, 770-772, 774,
776, 779, 789, 791
- emoción: 519
- Emmeche, C.: 633-634
- energía: 25, 27, 33, 128, 133-137, 141, 149, 151,
153-185, 190-194, 211, 216-217, 224-226,
231, 247, 276, 277-281, 283-284, 317, 320,
329-332, 345-347, 351-354, 357, 395-397,
400, 404, 430-431, 437, 452-454, 477, 483-
484, 507-516, 518, 520, 525, 529, 541, 546-
548, 558, 625-626, 663, 706, 710, 718
- enlace de amida: 265
- enlace Heitler-London: 129, 132, 152
- enlaces de hidrógeno: 348, 358, 371-372, 410,
765
- enlace de tioéster: 320-321, 346, 410
- entrecruzamiento: 541
- entropía: 139-141, 144-143, 147, 151, 166-167,
173, 277, 279, 281, 316-317, 403, 621, 626,
706, 807
- enzimología: 631
- Epicuro: 92-93, 189
- epigénesis: 198, 740-741; *véase también* prefor-
macionismo
- equilibrio puntuado: 743-744, 747
- especiación, alopátrica: 533, 743; simpátrica:
534; *véase también* cladogénesis
- espectrofluorimetría: 573
- espíritus animales: 54-56, 58
- esporas: 492, 514-516, 618, 697, 716-717, 808,
810
- Eucaria: 336, 416
- eucariotas: 220, 233-234, 331, 336, 388-392,
394-399, 416, 420-421, 608, 695, 789, 806
- evolución, abierta: 630-656, 809; convergente:
421; darwiniana: 26-27, 32, 187, 200, 240,
249, 253, 272, 281, 327, 343-346, 348, 352,
354, 364, 366-367, 375, 433-435, 437, 440,
454, 523, 599, 602, 610, 636-637, 639, 655,
665-667, 676, 699-701, 731, 741, 752-753;
dirigida: 587; emergente: 207; lamarckiana:
610, 723-724, 732, 737-738, 741, 817; mo-
lecular: 289, 305, 308-309, 312, 548-549,
646; química: 27, 34, 278, 293, 311, 315,
318
- excitabilidad: 57, 218
- exobiología: 222, 728, 731
- exón: 727
- experimento mental del cuarto chino: 468-469
- experimento de Miller-Urey: 256-258; *véase*
también evolución química
- explosión cambriana: 388, 692, 790
- extinción: 82, 182, 197, 281, 329, 404, 407, 441,
533-534, 612, 679, 692, 802
- extremófilos: 362, 397-398
- FACS (separación celular activada por fluores-
cencia): 424-425

- fagocitosis: 394
 fenotipo: 209, 211, 304, 433, 475, 540-541, 647-648, 650, 655, 723-724, 740, 753-755, 782
 Ferri, Francesca: 551
 fertilización: 23, 194, 233
 filogenia: 194, 331, 392-393, 704, 752, 755
 finalismo, *véase* teleología
 fisicismo: 188-207, 316-317, 522; *véase también* materialismo
 fisiología animal: 31, 192, 492, 698-710, 733
 Fleischaker, G. R.: 638, 663n, 667n
 Florkin, Marcel: 289
 Fodor, Jerry: 462, 815
 Forbes, Nancy: 589
 fosforilación: 162, 262, 320, 364, 781
 fósiles moleculares: 273, 289
 fotosíntesis: 331-333, 336, 388, 394, 413, 437, 471-472, 487, 503, 622, 626, 666, 694, 710-711, 713-714, 718
 Foucault, Michel: 590-592
 Fox, Sidney: 313-316
 Fry, Iris: 248, 285-322, 407
 fuerza de Van der Waals: 329
 funcionalismo: 450-451, 459-479, 507-509, 517, 525, 609-610, 666-667, 811, 813, 815; *véase también* realización múltiple
 Gaia: 607-608, 613, 721-722
 Galileo: 190-191, 196, 489-490
 gametos: 464, 592
 ganglios: 531
 Gánti, Tibor: 26-28, 35-36, 214-235, 245, 455, 613
 gen: 33, 128-129, 131-138, 174, 208, 223, 245-246, 249, 247, 271-272, 295-296, 307, 310-313, 319, 330, 334-336, 338, 393, 402, 417-418, 455, 475, 519, 544-546, 548, 551, 554-561, 563-567, 572, 574, 576-580, 592, 605, 619-620, 625, 637, 646, 668, 693, 721, 727, 740-741, 751, 753-754, 759, 761-762, 766, 776, 781-783, 806; expresión: 422, 573, 781, 790; línea germinal: 723-724, 737; regulación: 588, 789; transferencia: 252, 414-415, 434-436, 755
 genética(o), algoritmo: 453, 540, 812; mendeliana: 34, 208; modificación: 587; de poblaciones: 459, 472, 751; programa: 35, 189, 198-199, 201-202, 204-205, 207, 209, 211, 216, 540-541, 796, 801; redundancia: 555-556; remplazo: 751
 genoma: 247, 263, 282, 335, 342, 345, 395, 414-415, 417, 435-436, 455, 475, 553-559, 572, 576, 578-579, 612, 647, 650, 727, 732, 740, 769, 773, 776, 781-783
 genómica comparativa: 559
 genotipo: 187, 209-211, 304, 313, 472, 648, 655, 723, 753-754
 GFP (proteína fluorescente verde): 548-549, 572-574
 Gibbs, Willard: 122, 142
 Gil, R.: 555, 559-560
 Gillespie, Neal: 747n-748
 Glade, N.: 575
 glándula pineal: 54, 61n
 glucosa: 353, 364, 396, 519, 708
 Goodwin, Brian: 523, 723
 Gould, Stephen Jay: 609, 697, 723, 746-747, 749, 753
 gradualismo: 743-747, 749-751
 Grand, Steve: 518, 521, 585
 gravedad: 65, 123, 197, 693, 700
 Griffiths, Paul: 358, 599, 602, 605, 607-610, 720
 Haldane, J. B. S.: 34, 203, 206, 293, 318-319, 805
 Helmholtz, Hermann: 192
 Heráclito: 161, 185
 herencia: 139, 193, 220-222, 242, 282-283, 414, 433-434, 507, 524, 610, 628, 632, 635-636, 642, 646-648, 668, 706, 723, 735, 737, 739
 heterótrofos: 332, 407, 652
 híbridos: 26, 415, 417, 589, 620
 hidrocarburos: 355, 358-359, 432, 575
 hidrólisis: 162, 357, 359
 hiperciclos: 312-315
 hilozoísmo: 76, 92, 95, 153
 hipótesis del mundo del ARN: 28, 33, 244-248, 260-263, 265, 273, 275, 281, 284, 304, 310-315, 320, 373, 375, 545, 646, 648, 655, 668, 678, 765
 hipótesis de Oparin-Haldane: 34, 319
 holismo: 205-207, 298, 608, 613, 770
 Holland, John: 389, 817
 Holm, N. G.: 411n
 homeostasis: 217-219, 312, 483, 501, 639-640, 643, 646, 721, 784-786, 790

- Homo sapiens*: 390, 628, 692-693, 718
 hormona: 209, 628
 Hoyle, Fred: 296, 301-302, 525, 744
 Huxley, Thomas: 702, 743-744, 748

 idealismo: 91-95, 156, 162, 164, 166
 inmunología: 484, 738
 impresión: 60-62, 121, 168
 improvisación: 625-628, 634
 integrón: 207-208
 inteligencia artificial, fuerte vs. suave: 447, 449-450, 460, 585, 812
 intencionalidad: 24-25, 28, 93-94, 99, 113, 162, 164-165, 169, 180, 185, 301-302, 469-471, 474, 703; *véase también* teleología
 isomerismo: 128-129, 132, 134, 137, 311
 intrones: 727

 Jacob, François: 202, 207, 591
 Joyce, Gerald: 293n, 304n, 310-311, 315, 412n, 433n, 636, 663n, 666
 juicio: 64-114, 523, 692, 696

 Kant, Immanuel: 23, 25, 28, 31-34, 64-114, 199, 202, 240, 298-300, 302, 453-454, 476
 Kauffman, Stuart: 27, 30, 33, 284, 318, 446, 450, 523, 599, 609-613, 636, 723, 759, 767n, 771n, 774n-777n, 787n, 789n-790n
 Kepler, Johannes: 89
 kinesinas: 575
 Knight, Tom: 588
 Koestler, A. E.: 741n
 Koshland, Daniel: 601, 624, 631, 634, 663n, 672n, 677n, 696
 Kripke, Sayl: 606, 803
 Kuhn, Thomas: 418-419, 674, 682, 684

 Lamarck, Jean-Baptiste: 437n, 591-593, 701, 732, 736
 Lancet, Doron: 282, 647n
 Lange, Mark: 25, 449-452, 457, 481, 590, 602, 613
 Langevin, Paul: 122
 Langton, C. G.: 449n, 481n-483, 503, 507-510, 521-522, 585
 Lederberg, Joshua: 484-485, 496
 Levy, Steven: 481n, 508n, 590
 Lewontin, Richard: 464, 636n, 733n, 754n

 ley de Curie: 122, 575
 ley Hardy-Weinber: 472-473
 Libehaber, A.: 547, 568, 573-574
 libre voluntad/albedrío: 694, 699, 705, 707-708
 Linneo: 390
 lípidos: 170, 209, 279, 314, 417, 421, 547, 560, 566, 568, 570, 573, 575-577
 liposomas: 347, 354, 455-456, 548, 566, 568-577, 579, 774
 Lindgren, Kristian: 812n, 817n
 línea germinal: 723-724, 737
 Locke, John: 674, 680-684
 Loeb, Jacques: 192, 194, 196
 Lovelock, James: 607, 652n, 655n
 Ludwig, Carl: 192, 194, 196
 Luisi, Pier Luigi: 27, 448, 455-456, 551-584, 613, 636-637, 645
 Lund, H.: 530
 Lycan, William: 727

 máquinas: 24, 27, 31-34, 53-62, 76, 144, 152, 154, 165-183, 185, 190, 196, 206, 224-226, 244, 466, 471-472, 477, 482-484, 487, 504, 512, 529, 531, 533, 535-538, 540-541, 545, 548, 557, 568, 585-586, 590, 593, 618-621, 696, 707, 715, 726, 733, 738
 macromoléculas: 201, 209, 226, 245, 249-250, 295-296, 305-307, 311, 328, 330, 334, 408, 424, 432-434, 450, 454, 546-548, 563-564, 657, 612, 646, 651, 654, 796, 802, 810
 macromutación: 743-747, 750
 mamíferos: 146, 406, 503, 617, 676-677, 681, 692, 698, 702, 705, 709, 813
 Margulis, Lynn: 607-608, 613, 634, 643, 652n
 Marr, David: 727
 materialismo: 153, 156-158, 163-164, 177, 298-299, 317, 319-320, 461, 694
 Matthews, Eric: 64n
 Maturana, Humberto: 27, 455, 524, 600, 638
 Maynard Smith, John: 312n, 524n, 529n, 639, 650, 732, 797n-799n, 807n, 810n, 812n
 Mayr, Ernst: 25-28, 34-36, 240, 297-302, 450, 454, 632, 732, 735, 739, 742, 750-752, 796, 801, 805
 mecánica cuántica: 27, 33, 128-129, 134, 152, 177-178, 203, 478, 760-762
 mecanismo de relojería: 55, 62, 76, 148-152

- Medawar, Peter: 484, 496, 591n
- medio ambiente: 27, 35-36, 120, 127, 140-141, 143, 145, 150, 154, 160-163, 167, 180, 187, 211, 217-218, 224, 248-249, 251, 266, 278-281, 284, 293, 305-306, 309, 311, 318, 335, 346-349, 356-359, 362, 375-376, 387-388, 394-395, 398, 413, 423, 433-435, 438-439, 451, 471-472, 475, 483-484, 507, 511, 532, 549, 586-587, 613, 617, 620, 625, 664, 692, 702-703, 705-706, 711-712, 721-722, 738, 784, 800, 814
- meiosis: 464, 691-692
- membrana: 201, 209, 226-231, 233, 267, 279, 281, 314, 350, 364, 394-395, 417, 421, 454-455, 545-549, 560-561, 563-564, 566, 568-569, 571, 575, 577, 625, 645, 651, 709, 766
- meme: 724
- MEMS (sistemas mecánicos microelectrónicos): 539
- Mendel, Gregor: 34, 208, 303
- metabolismo: 27-28, 33, 35, 141, 161-163, 168, 171-173, 179-180, 211, 216, 219, 222, 226-227, 229-231, 233-234, 245-251, 253, 259, 266, 276, 278, 282-284, 290, 303, 312, 314, 318, 320, 328, 330, 332-333, 335, 346, 352, 354-355, 357, 364, 369-370, 373, 387, 390, 394-395, 398, 400-401, 407, 413-414, 416-417, 430-432, 434-435, 446, 450-455, 484, 488, 506-507, 509-526, 545-546, 551-552, 557-558, 561, 579, 602, 607-608, 619, 632, 636-637, 639, 644, 648, 650-652, 664, 666-667, 677, 722, 766, 789, 812
- metafísica: 29, 84, 184, 189-190, 195, 198, 200, 202, 206-207, 209, 605
- metazoarios: 233
- metanogénesis: 330-331
- micobacterias: 423
- microesferas protenoideas: 313-315
- microscopio electrónico: 420, 697
- microtúbulos: 576, 712
- Miller, Stanley: 256-258, 274, 749
- miotomas: 745
- mitocondria: 233, 336, 409, 421, 705, 712, 714, 725
- mitosis: 221, 704
- modelos de cuasiespecies: 305, 307-308, 313, 637
- modelos de replicación antiguos: 724
- Monod, Jacques: 284, 295-297, 299-302, 306-307, 662n
- Moravec, H.: 539
- Moreno, Álvaro: 517n, 637n-638n, 644n, 648n-650n
- morfología: 34, 230, 416, 421, 530-533, 536, 541, 603, 648, 676, 733, 738
- Morgan, Lloyd: 207
- Morgan, Thomas: 174, 750
- Morowitz, Harold: 290-293n, 294, 314-315, 356, 552, 621-622, 644, 654n
- Müller, Hermann Joseph: 174, 271-272
- mutagénesis: 555, 558
- mutabilidad: 135-137, 197
- mutación: 128, 133-137, 145, 303, 307-308, 337, 433-436, 454, 472-474, 515, 533, 540, 546, 619-620, 625, 628, 690, 745-746, 761, 777, 791, 800; presión de la: 750-751
- mutacionismo: 743-746, 750
- Mycoplasma genitalium*: 552-553, 556
- nanofabricación: 539
- NASA: 250-251, 272, 343-346, 351, 362, 385, 429-431, 601, 636, 718
- Nernst, Walter: 151
- nervios: 53-55, 57-59, 62, 740, 745
- Newton, Isaac: 24-25, 31-32, 100, 122, 148, 165, 190, 196-197, 240, 300, 604-605, 682, 700, 707, 763
- nitrógeno: 141, 257, 274, 328, 349, 351, 360, 368-369, 376, 403, 432, 485-486, 488
- nivel trófico: 394
- Noireaux, V.: 547, 568, 573-574
- norns: 518-520
- Novikoff, Alex: 206
- núcleo (de la célula): 132, 193-194, 201, 220, 233, 394, 417, 781
- nucleobases: 357, 359, 365-368, 371-374
- nutrición: 30, 39, 43-44, 46-52, 54, 62, 163, 168, 173, 194, 217, 227, 232, 397, 399, 414, 417, 435, 452, 520, 546, 548-549, 573, 579, 626-627, 737
- oligonucleótidos: 261-262, 264, 305, 312, 320, 417
- oligosilanos: 350-351
- ontogenia: 704, 760, 781, 789-790

- Oparin, Alexander: 25-28, 33-36, 153-185, 240, 244, 247, 277, 286-287, 293, 303, 312, 314, 316, 318-319, 447, 450, 454, 601, 632
- optimons*: 752
- organicismo: 35, 189, 202-208, 316-317
- organismos, digitales: 481, 586; multicelulares: 218, 220, 233-234, 389, 413, 513-514, 690, 790; protoorganismos: 407, 413, 415; sintéticos: 587; de *software*: 487, 496, 500n-501n, 503; unicelulares: 146, 221, 296, 389-391, 514, 553
- órganos: 31, 40, 42, 50, 53, 55, 61-62, 75-76, 79, 82, 119-120, 127, 156, 164-165, 168, 179-180, 206, 211, 231-232, 394, 491, 494, 519, 625, 629, 693, 736, 742, 745-746, 749, 801, 805-806, 809
- Orgel, Leslie: 30, 240, 245-247, 255-273, 289, 294, 754, 764-765
- origen de la vida: 28, 33-34, 147, 159, 177-182, 184-185, 209, 223, 239-240, 244-250, 253-267, 271-273, 276-277, 282-283, 285-294, 296-298, 300, 302, 305, 310, 312, 315-316, 318-319, 321-322, 338, 374, 407, 412, 414-415, 423, 433, 436, 447, 456, 485, 545, 548-549, 580, 622, 631, 640, 653-655, 666-668, 676-677, 722, 731, 764, 791-792, 797, 806; *véase también* experimento de Miller-Urey, hipótesis del mundo del ARN
- ortogénesis: 289
- óvulo/huevo: 23, 137, 146, 196, 198, 211, 232-233, 710, 716
- oxidación: 162, 172-173, 261, 282-283, 330, 332, 431, 618, 622, 626
- oxígeno: 122, 130, 141, 274, 279, 326, 328, 330, 336, 349, 351, 359, 368-369, 376, 387-389, 394, 396-397, 399, 403, 430, 432, 456, 485-486, 488, 520, 606, 673, 681, 705, 708, 710, 714
- Pace, Norman R.: 28, 30, 240, 244-245, 249-251, 326-338, 450, 452, 600, 609, 613
- Packard, Norman: 36n, 773, 787n, 795n, 809, 814n, 817n
- paleontología: 743-744, 752
- panspermia: 292-294, 302
- paramagnetismo: 121, 123
- parámetro lambda: 522
- pared celular, *véase* membrana
- Pattee, Howard: 586-587, 647n, 649n-650n
- Peretó, Juli: 630-660
- Planck, Max: 149-151, 185, 674
- plásmidos: 572, 574-575
- Platón: 29, 65, 156, 189, 489
- Plinio: 491
- polimerasas: 261-262, 363, 371, 373, 418, 455-456, 544, 548, 561-562, 567, 570-575, 578, 765
- polimerización: 454, 546, 549
- polisilanos: 350
- Pollack, Jordan: 446, 448, 453-454
- Popper, Karl: 297, 473-474
- Polyporus*: 491
- preformacionismo: 740-741; *véase también* epigénesis
- principio de complementariedad (en la biología molecular): 203, 371-372
- principio de indeterminación de Heisenberg: 203
- priones: 420, 485, 608, 721
- problema del marco: 812
- procariotas: 209, 220, 229-233, 336, 389-397, 399-400, 553-554, 576, 696-697, 806; *véase también* eucariotas
- proteínas, plegamiento: 557; estructura: 170, 172-173, 409, 761-762; expresión: 548, 570, 572-575; síntesis: 241, 261, 284, 295, 304, 313, 336, 410, 414, 455-456, 544, 547-549, 560-562, 567, 569, 573, 577-578, 709
- proteobacterias: 336
- proteoma: 554-556
- protista: 239, 391-392, 416, 697, 711, 714, 716
- protocélula: 276, 304, 314, 448, 552, 568, 655; *véase también* biología sintética
- protoplasma: 25, 174, 196, 201
- prueba de Turing: 466-468, 471, 478
- Ptolomeo: 490
- Putnam, Hillary: 462, 606, 683-684
- quiralidad: 141, 267, 306, 330, 344, 676
- Rasmussen, Steen: 36n, 448n, 455n-456n, 632n, 666n, 795n, 800n, 809n, 814n
- Ray, Thomas: 509-510, 521, 526, 726, 817
- rayos X: 131, 135-137, 693

- reacción en cadena de las polimerasas: 371, 418, 571
 realización múltiple: 450, 461, 478, 726-727, 811, 813; *véase también* funcionalismo
 red booleana: 611, 776-780, 783-786, 788-789
 redes alimenticias: 652
 regeneración: 198-199, 220, 225, 626, 628, 634, 644
 regulación, autorregulación: 35, 199, 217, 222, 395, 607, 645, 677, 721; de la expresión de los genes: 588; metabólica: 352
 relaciones de parentesco: 603, 680
 replicación: 30, 221, 243, 261-262, 264, 266, 272, 275-277, 282, 284, 303-305, 307-309, 311-314, 316, 321-322, 328-329, 344, 348, 366-367, 404, 408, 414, 433-434, 436-439, 469, 546, 558, 560-561, 563-564, 569-571, 619-620, 622, 625, 647, 649-650, 655, 667, 722, 724, 729, 752, 755, 762, 764-766, 808
 reproducción: 24, 30, 48-50, 135-136, 162, 164, 175, 177, 179, 185, 198-199, 211, 220, 222, 225, 229, 241, 271, 281-282, 344, 414, 433, 453, 455, 473, 475, 479, 487, 500, 507, 529, 551-552, 563, 566, 570-571, 576, 578, 603, 607-608, 611, 613, 617-619, 624, 632, 635-636, 642, 646-648, 654-655, 662, 664, 666-667, 677, 690, 694, 718, 722, 760, 770, 802, 806, 810
 respiración: 55, 62, 141, 156, 159, 166, 172, 388, 394, 430, 515, 618, 693, 698, 704-705, 713
 retícula endoplasmática: 421
 ribosomas: 241-244, 249, 273, 312, 314, 335, 340, 373, 375, 392, 393, 418, 455, 544-545, 547-548, 557, 560, 567, 571-572, 575, 578, 765-766
 ribosimas: 261, 273, 307, 310, 545, 549, 563-565, 771
 Ridley, M.: 731n, 745n, 748
 robots: 24, 182-183, 253, 407, 437-438, 446, 448, 453-454, 457, 506, 511, 516-517, 529-542, 585, 587, 599, 601, 656, 693
 Roux, Wilhem: 193-194
 Ruiz-Mirazo, Kepa: 26-27, 599, 601-602, 613, 630-656
 Ryle, Gilbert: 461
 saltacionismo: 741-743, 746-748, 750-751
 Sachs, Julius: 192, 194, 196
 Sagan, Carl: 271, 277, 344, 356, 372, 430, 600, 607-608, 613, 617-623, 643, 662
 Sagan, Dorion: 607, 690-719
 Schleiden, Matthias: 192
 Schrödinger, Erwin: 26-28, 34, 115-152, 174, 177-178, 202, 224, 450, 452, 612, 759-762, 764, 772, 774, 776, 781-782, 784-785, 788, 791-792; ecuación de: 33
 Schwartz, S. P.: 344n, 680n, 682n
scrapie: 420, 619
 Searle, John: 468-469, 471, 506n, 509
 selección, acumulativa: 307n, 739, 753-754; aislada: 753-754
 selección natural: 26, 32-34, 135, 164, 179-180, 187, 200-211, 240, 247, 249-250, 253, 305-306, 308-309, 312-313, 315, 317-318, 327, 332, 432-435, 454, 464, 546, 600, 610-613, 619-621, 636, 665-666, 690, 697-699, 706, 717, 722, 725, 731-732, 735, 737-740, 748-752, 754, 761, 773, 788-792, 794, 796, 799-802, 815, 817-818; *véase también* evolución, darwiniana
 Shapiro, Robert: 30, 33, 240, 246-248, 271-284, 305n, 316n, 321-322, 407, 634, 655, 663n
 sinapsis: 469, 519, 532, 626, 709, 727
 síntesis neodarwiniana: 307, 743
 sistema autocatalítico: 226-228, 592, 611-612, 767-771, 773, 788, 791
 sistema cardiovascular: 805
 sistema inmunológico: 218, 519, 739, 805-806
 sistema de pigmentación: 454, 546
 Smart, J. J. C.: 461
 Sober, Elliot: 446, 449-451, 459-479, 482, 484-485, 487-488, 502-503, 599, 796
 solipsismo: 697
 sopa primordial: 27, 34, 275, 300-301, 305-307, 320, 389
 Spei, Franciscus Bonae: 491
 Spinoza, Baruch: 92-94, 153
 Stano, Pasquale: 551-580
 Stebbins, G. L.: 743-744
 Sterelny, Kim: 599, 602, 605, 607-610, 720, 723n
 sulfuro: 141, 230, 328, 330, 360, 363, 413, 713, 718
 Sussman, Jerry: 588
 taxonomía: 392, 416, 457, 590, 592-593
 teleología: 25, 32, 66, 77, 83-86, 93, 95, 99, 109-

- 110, 112, 199-200, 202, 210, 295, 301, 700-701, 707
- teleonomía, *véase* teleología
- teorema de Nernst: 151
- teoría atómica: 499
- teoría del caos: 32, 783, 787
- teoría de la relatividad: 203, 682
- terminal de pantalla de visualización, VDU (*video display unit*): 506, 512
- termófilas: 398, 421, 553-554
- termodinámica, desequilibrio: 27, 250-251, 346-347, 363, 376, 432, 437, 439-440, 715, 764; primera ley de la: 166; segunda ley de la: 28, 211, 277, 314, 316-317, 452, 514, 621, 807; sistema abierto: 161, 164, 167, 211, 611, 621-622, 626, 705, 762, 764, 776, 784, 792; tercera ley de la: 151; *véase también* teorema de Nernst
- termoplasmas: 229
- tiempo de CPU (UCP, unidad central de procesamiento): 481, 487
- tierra gemela: 683-684
- tolerancia de error: 312
- transcripción: 336, 548, 557-558, 561-562, 570-571, 755, 781
- traducción: 241, 295, 312-314, 336, 375, 409, 544, 547-549, 557-558, 560, 649-650, 765, 781
- transporte celular: 394, 545, 548, 558, 575, 644
- trasplante: 224, 231
- último ancestro común (UAC): 256, 336, 406, 559, 642
- Urey, Harold: 256-257
- Varela, Francisco: 27, 455, 524, 600, 637n-638, 641n
- vesículas: 311, 314-315, 351, 412, 544-545, 547-549, 563-577, 774
- vida, autonomía y: 529, 630-656; celular: 36, 407, 447, 544-563, 564-565, 567, 579, 806; criterios de la: 36, 208-211, 214-228, 506, 617-623, 624-629; ciclo de: 144, 211, 755; digital/informacional: 449, 481, 585-586, 599, 601; distintivos de la: 25-28, 34-36, 451-452, 613, 795-796, 798, 801, 804; extraterrestre: 239, 249, 251-252, 326-327, 334-335, 340-341, 385-386, 390, 400-401, 404, 407, 423, 429-430, 435-436, 506-507, 515, 526, 599, 602, 610, 623-624, 661, 664-665, 669, 678-680, 731, 796; jerarquía de la: 232, 234, 250, 804-807; mínima: 28, 36, 245, 565-566, 637, 640, 651; origen de la: 28, 33-34, 147, 159, 177-182, 184-185, 209, 223, 239-240, 244-250, 253-267, 271-273, 276-277, 282-283, 285-294, 296-298, 300, 302, 305, 310, 312, 315-316, 318-319, 321-322, 338, 374, 407, 412, 414-415, 423, 433, 436, 447, 456, 485, 545, 548-549, 580, 622, 631, 640, 653-655, 666-668, 676-677, 722, 731, 764, 791-792, 797, 806; real: 232, 512, 520, 585-594; teorías de la: 23, 200, 303, 599, 602-605, 608-614, 728, 797, 818; *véase también* definición de la vida, organismos, origen de la vida
- vida artificial (ALife, AL), definiciones de: 481-483, 507-508, 522, 545-546, 612, 667, 677-678, 810, 812; fuerte: 449-451, 482-483, 506-507, 509-511, 513, 516-522, 526, 725; fuerte vs. suave: 24, 451, 601-602, 609, 611; húmeda: 446-449, 451, 453-456; suave: 445-450, 452-453, 509
- vida microbiana alternativa: 406-425
- virus: 210, 230, 242, 319, 420, 434, 436, 482, 485, 501, 556, 558, 608, 654, 666, 671, 676, 693, 721, 789, 803-804, 808, 810; computacional: 473-475, 482, 501; del sida: 371, 803
- vitalismo: 25, 34-35, 163, 189, 191-192, 194, 196-203, 483, 486, 492
- voluntariedad: 33-35, 700; *véase también* teleología
- Von Liebig, Justus: 192
- Von Neumann, John: 507, 548, 586
- Walde, P.: 569-570
- Walter, Gilbert: 273
- Walter, Grey: 176, 511
- Ward, Peter: 413, 431
- Wittgenstein, Ludwig: 461, 603, 680
- Woese, C.R.: 246, 392, 421, 553
- zona habitable: 331-332, 361, 438, 655

ÍNDICE GENERAL

<i>Sumario</i>	7
<i>Prefacio</i>	9
<i>Agradecimientos</i>	11
<i>Introducción</i>	13

Primera parte

ESTUDIOS CLÁSICOS SOBRE LA VIDA [21]

I. <i>Acerca del alma (fragmentos)</i>	39
I. <i>Basta con lo dicho...</i>	39
II. <i>Dado que lo que es claro...</i>	42
III. <i>De las facultades del alma...</i>	46
IV. <i>El que va a investigar...</i>	48
Bibliografía	52
II. <i>El tratado del hombre (fragmentos)</i>	53
III. <i>Crítica del juicio (fragmentos)</i>	64
De la finalidad objetiva que es simplemente formal, a diferencia de lo que es material	64
De la finalidad de la naturaleza que no es más que relativa, a diferencia de la que es interior	68
Del carácter propio de las cosas, en tanto que fines de la naturaleza . . .	71
Las cosas, en tanto que fines de la naturaleza, son seres organizados . . .	74
Del principio del juicio de la finalidad interior en los seres organizados . .	78
Del principio del juicio teleológico sobre la naturaleza, considerada en general como un sistema de fines	79
Del principio de la teleología como principio interno de la ciencia de la naturaleza	83
¿Qué es una antinomia del juicio?	86

Exposición de esta antinomia	87
Preparación para la solución de la precedente antinomia	89
De los diversos sistemas sobre la finalidad de la naturaleza	90
Ninguno de los sistemas precedentes da lo que promete	93
La imposibilidad de tratar dogmáticamente el concepto de una técnica de la naturaleza viene de la imposibilidad misma de explicar un fin de la naturaleza	96
El concepto de una finalidad objetiva de la naturaleza es un principio crítico de la razón para el juicio reflexivo	98
Observación	101
De la propiedad del entendimiento humano por la cual el concepto de un fin de la naturaleza es posible para nosotros	104
De la unión del principio del mecanismo universal de la materia con el principio teleológico en la técnica de la naturaleza	109
IV. <i>¿Qué es la vida? (fragmentos)</i>	115
Índole y propósito de la investigación	115
La física estadística. La fundamental diferencia de estructura	116
El planteamiento del tema por un físico ingenuo	117
¿Por qué son tan pequeños los átomos?	118
El funcionamiento de un organismo requiere leyes físicas exactas . .	120
Las leyes físicas se basan en estadísticas atómicas y por lo tanto sólo son aproximativas	121
Su precisión se basa en la gran cantidad de átomos involucrados. Primer ejemplo (paramagnetismo)	121
Segundo ejemplo (movimiento browniano, difusión)	123
Tercer ejemplo (límites de la precisión de la medición)	126
La regla $\sqrt{n}$	127
La idea general de la sustancia hereditaria	128
La singularidad de la idea	128
Algunas ideas tradicionales erróneas	129
Diferentes “estados” de la materia	130
La distinción que realmente importa	131
El sólido aperiódico	132
La diversidad de contextos comprimida en el código miniatura . . .	132
Comparación con los hechos: grado de estabilidad; discontinuidad de las mutaciones	133

La estabilidad de los genes naturalmente seleccionados	134
La estabilidad a veces más baja de los mutantes	135
La influencia de la temperatura es menor en los genes inestables que en los estables	135
Cómo producen la mutación los rayos X	136
Su eficiencia no depende de la mutabilidad espontánea	137
Mutaciones reversibles	137
Una notable conclusión general a partir del modelo	138
El orden basado en el orden	138
La materia viviente elude decaer y llegar al equilibrio	140
Se alimenta de “entropía negativa”	140
¿Qué es la entropía?	141
El significado estadístico de la entropía	142
La organización se mantiene extrayendo el “orden” del medio ambiente	143
Las nuevas leyes que podemos esperar en el organismo	144
Resumen de la situación biológica	144
Resumen de la situación física	145
El contraste sorprendente	146
Dos formas de producir el orden	147
El nuevo principio no es desconocido para la física	148
El movimiento de un reloj	149
El funcionamiento al fin y al cabo estadístico de los mecanismos relojeros	150
El teorema de Nernst	151
El reloj de péndulo prácticamente se encuentra a una temperatura cero	151
La relación entre un mecanismo relojero y el organismo	152
 V. <i>La naturaleza de la vida</i>	 153
La amplitud de la vida	153
La discusión entre el idealismo y el materialismo respecto a la naturaleza esencial de la vida	156
Conceptos mecánicos y dialécticos de la vida	157
Los intentos de formular definiciones de la vida	158
La interacción específica entre el organismo y su medio ambiente	160
La “intencionalidad” de la organización de los cuerpos vivientes	162
Los intentos de ver el organismo como una máquina	165
La cibernética	167

Evaluación de las hipótesis mecanicistas contemporáneas	170
Sólo es posible comprender la vida mediante el estudio de su origen y desarrollo	179
Bibliografía	186
VI. <i>¿Cuál es el significado de la “vida”?</i>	187
Los fisicistas	189
El florecimiento del fisicismo	192
Los vitalistas	195
La decadencia del vitalismo	200
Los organicistas	203
La emergencia	207
Las características distintivas de la vida	208
Bibliografía	211
VII. <i>Los principios de la vida (fragmentos)</i>	214
Los criterios de la vida	214
Criterios de vida reales (absolutos)	216
Criterios de vida potenciales	219
Niveles de vida y muerte	223

Segunda parte

EL ORIGEN Y LA AMPLITUD DE LA VIDA NATURAL [237]

VIII. <i>El origen de la vida: un resumen de los datos y las especulaciones</i> . .	255
La síntesis abiótica de pequeñas moléculas orgánicas	256
La autoorganización	260
Conclusión; perspectivas	266
Bibliografía	267
IX. <i>Las interacciones de las moléculas pequeñas fueron centrales en el ori- gen de la vida</i>	271
Un origen de la vida más sencillo	271
Cuando el ARN dominaba el mundo	272
La olla de la sopa está vacía	274
La vida con moléculas pequeñas	277
El cambio de paradigma	282

X. <i>¿Son tan diferentes las distintas hipótesis sobre la emergencia de la vida?</i>	285
Introducción	285
Sobre la “tesis de la continuidad” y varios “principios de la continuidad”	288
Formulación de Morowitz sobre la tesis de la continuidad	291
La teoría de la panspermia y la tesis de la continuidad	292
El “campo del casi milagro”	294
El “campo de la ley”	302
La teoría de la autoorganización molecular de Manfred Eigen	305
Algunos de los problemas en la teoría de Eigen y en las teorías del mundo del ARN	310
La tesis de la continuidad en las teorías de la célula primordial . . .	315
El valor heurístico de la tesis de la continuidad	319
Conclusión	322
Bibliografía	323
XI. <i>La naturaleza universal de la bioquímica</i>	326
¿Qué es la vida?	327
¿Por qué la química orgánica?	328
La naturaleza universal de la bioquímica	329
Los límites físicos de la vida: la zona habitable	331
La firma genética de la vida terráquea	334
Bibliografía	338
XII. <i>¿Existe un modelo químico común de la vida en el universo?</i>	340
Introducción	340
¿Qué es la vida?	343
Los requisitos básicos de la vida	346
El desequilibrio termodinámico	346
Los enlaces	348
El aislamiento dentro del medio ambiente	348
El ensamblaje de carbono	349
Patrones energéticos en el metabolismo	352
El disolvente	352
La vida en ambientes similares al terráqueo	362
El agua como disolvente	362
Ventajas y desventajas del agua	363

Las restricciones universales para la vida en el agua	364
El dipolo repetido como aspecto estructural universal de los catali- zadores en el agua	368
Aspectos estructurales universales de los metabolitos en el agua . .	369
Problemas universales en el agua	370
Las nucleobases del ADN como ilustración de la dialéctica	371
La vida no terráquea en la Tierra	375
Conclusiones	376
Bibliografía	376
 XIII. <i>La búsqueda de la vida en el universo: enseñanzas de la Tierra</i> . . .	385
Bibliografía	404
 XIV. <i>La posibilidad de vida microbiana alternativa en la Tierra</i>	406
Introducción	406
¿Cómo podría ser un tipo de vida ligeramente diferente?	408
¿Podría coexistir la vida alternativa con la vida conocida en la Tierra?	413
Las limitaciones de las tecnologías actuales	416
El cuestionamiento del paradigma de la vida en la Tierra	418
Conclusiones	422
Bibliografía	425
 XV. <i>Introducción a los límites de la vida orgánica en los sistemas planetarios</i>	429
La búsqueda de la vida en el cosmos	429
Definición de la amplitud del problema	432
¿Es la evolución un aspecto esencial de la vida?	433
Breves consideraciones en torno a las posibles formas de vida no in- cluidas en este informe	436
Estrategias para mitigar el antropocentrismo	438
Bibliografía	441

Tercera parte

LA VIDA ARTIFICIAL Y LA BIOLOGÍA SINTÉTICA [443]

XVI. <i>Enseñanzas del funcionalismo: el porvenir de la vida artificial fuerte</i>	459
Dos usos de las computadoras	459

El problema de la mente y el problema de la vida	461
Si las propiedades psicológicas no son físicas, ¿entonces qué son?	465
El conductismo y la prueba de Turing	466
El peligro de ir demasiado lejos	472
De la cognición humana a la vida artificial; de la biología a la vida artificial	474
Comentarios finales	478
Bibliografía	479
 XVII. <i>La vida, la “vida artificial” y la explicación científica</i>	481
Introducción	481
Los “signos de vida” y cómo no demostrar que el concepto de la “vida” es innecesario en la biología	483
La vitalidad como explicación de los “signos de la vida”	487
El valor de las explicaciones que invocan la vitalidad	493
La vida es interesante más allá de los “signos de la vida”	500
Bibliografía	504
 XVIII. <i>La vida alienígena: ¿cómo sabríamos?</i>	506
Introducción	506
Tres conceptos del metabolismo	510
El metabolismo fuerte y la vida artificial fuerte	516
¿Podemos dejar de lado el metabolismo?	521
Bibliografía	526
 XIX. <i>Diseño y manufactura automáticos de formas de vida robóticas</i> . .	529
Métodos	539
Bibliografía	542
 XX. <i>¿Un paso gigantesco hacia la vida artificial?</i>	544
Introducción	544
Definición de la vida artificial	545
La vida en el laboratorio	546
¿Un segundo origen de la vida?	548
Bibliografía	550

XXI. <i>Las células mínimas semisintéticas experimentales: un resumen</i> . . .	551
La noción de una célula mínima	551
El genoma mínimo	553
¿Qué significan estas cifras en relación con el número de genes mínimo?	555
Especulaciones suplementarias	557
Reducciones adicionales	562
La célula de ARN mínima	563
Hacia la construcción de la célula de proteína/ADN mínima: preparación del terreno	565
Etapas preliminares: la reactividad en las vesículas	566
La expresión proteica en los liposomas	572
¿Qué sigue?	576
Comentarios finales	578
Bibliografía	580
XXII. <i>La creación de “vida auténtica”</i>	585
Bibliografía	594

Cuarta parte

DEFINICIÓN Y EXPLICACIÓN DE LA VIDA [597]

XXIII. <i>Definiciones de la vida</i>	617
Fisiológica	618
Metabólica	618
Bioquímica	619
Genética	619
Termodinámica	621
Resumen	622
XXIV. <i>Los siete pilares de la vida</i>	624
XXV. <i>Una definición universal de la vida: autonomía y evolución abierta</i>	630
Introducción	630
Los requisitos que debe satisfacer una definición de la vida	632
Breve examen de dos definiciones significativas	635

Nuestra propuesta: la autonomía y la evolución abierta como ingredientes básicos de una nueva definición universal del ser viviente	640
Construcción de una explicación genealógica de nuestra definición	642
Implicaciones teóricas: la vida es un fenómeno histórico-colectivo	651
Implicaciones prácticas	654
Bibliografía	656
XXVI. <i>¿Hay una definición de la “vida”?</i>	661
Introducción	661
Los intentos de definir la vida	662
Definiciones	668
¿Qué es la vida?	675
Apéndice 1: La teoría del significado de Locke	680
Apéndice 2: John Locke y Thomas Kuhn	682
Apéndice 3: Una nueva teoría del significado	682
Bibliografía	685
XXVII. <i>Sinfonía de los sentidos</i>	690
Una vida dual	690
La elección	695
Pequeñas resoluciones	698
La blasfemia de Butler	701
Hábitos y memoria	705
Celebración de la existencia	707
La superhumanidad	710
La expansión de la vida	711
Ritmos y ciclos	716
Bibliografía	719
XXVIII. <i>¿Qué es la vida?</i>	720
Definición de la vida	720
Bibliografía	729
XXIX. <i>El darwinismo universal</i>	731
La complejidad adaptativa como diagnóstico de la vida	733
Otros temas para una ciencia futura del darwinismo universal	754
Bibliografía	756

XXX. <i>¿Qué es la vida? ¿Tuvo razón Schrödinger?</i>	759
El argumento de Schrödinger	760
El origen de la vida como fase de transición	764
Las fuentes del orden dinámico	776
Los regímenes caóticos, ordenados y complejos	779
Redes reticuladas booleanas y el borde del caos	785
Orden y ontogenia	789
Resumen	791
Bibliografía	792
XXXI. <i>Cuatro enigmas sobre la vida</i>	795
Qué explica el fenómeno de la vida	795
La teoría de la vida como adaptación flexible	798
Cuatro enigmas y las soluciones propuestas	804
Cuestiones abiertas y conclusiones	816
Bibliografía	818
<i>Bibliografía suplementaria sobre la vida</i>	823
Discusiones clásicas sobre la vida	823
El origen y la amplitud de la vida natural	825
La vida artificial y la biología sintética	830
La definición y la explicación de la vida	835
<i>Acerca de los autores</i>	839
<i>Índice analítico</i>	851

La vida, cuando se le intenta explicar, es indefinible,
y sin embargo conocer su origen y naturaleza
es una inquietud milenaria del hombre.

Si bien la ciencia contemporánea ha ampliado nuestro
entendimiento acerca de la complejidad de la vida natural,
al tiempo que ha logrado construir varios ejemplos de sistemas
de vida artificial, la respuesta sobre qué es la vida
aún está lejana. Los textos reunidos en este volumen abordan
tres interrogantes: ¿qué características poseen todos
los seres vivos?, ¿qué descripciones y teorías definen mejor
la esencia de la vida? y ¿cómo construir y evaluar
de manera adecuada los nuevos planteamientos
acerca de su naturaleza? Los ensayos que los compiladores
nos brindan en esta obra van desde estudios clásicos
de filosofía hasta descubrimientos recientes de la biología
sintética y molecular, introduciendo así al lector en una reflexión
interdisciplinaria sobre la naturaleza de la vida.

CIENCIA Y TECNOLOGÍA



FONDO
DE CULTURA
ECONÓMICA

